

版权注意事项：

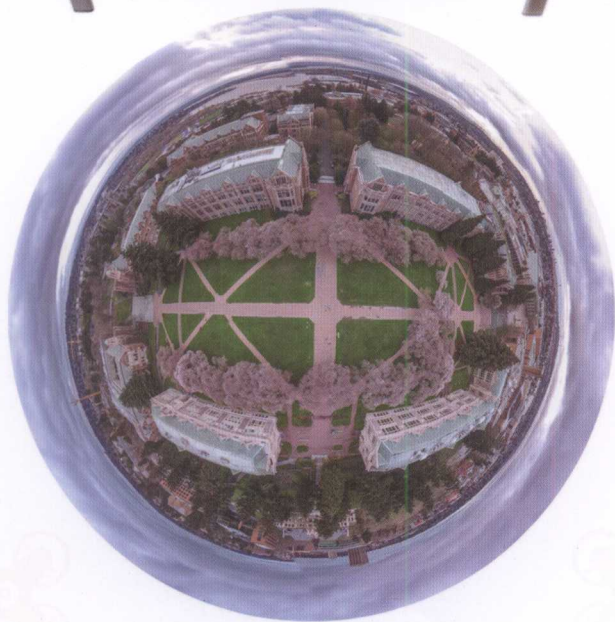
- 1、书籍版权归作者和出版社所有
- 2、本PDF仅限用于个人获取知识，进行私底下的知识交流
- 3、PDF获得者不得在互联网上以任何目的进行传播
- 4、如觉得书籍内容很赞，请购买正版实体书，支持作者
- 5、请于下载PDF后24小时内删除本PDF。




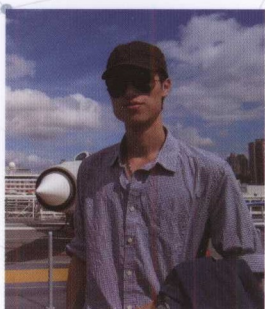
城堡里学 无人机

原理、系统与实现

杨 浩 / 编著



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



本书作者

杨浩，华南理工大学控制理论与控制工程专业无人机方向在读博士，具备较丰富的无人机技术知识及实现经验，具备多应用领域、多类型无人机机型设计，硬件、算法系统研发等项目经验及相关无人机企业顾问经验。著有《从刻漏到无人机：摘下控制学理论与工程的面具》一书，并以“无人机中的城堡”为ID活跃于知乎平台，通过专栏写作、活动演讲、平台公开课等形式分享无人机技术、市场、发展等知识。

城堡里学无人机： 原理、系统与实现

杨 浩 编著



机械工业出版社

本书是一本关于无人机概念、原理、系统与实现的参考书，共分三篇，七个章节。主要内容有：无人机的故事、无人机的类型和控制方式、无人机的软硬件系统、无人机行业应用、以及学习无人机所需的基础技能和各种共享资源等相关知识。本书着重阐释了无人机行业、市场、读者职业三者之间的相互关系，并结合无人机实际应用和制作指导为读者提供进入无人机领域的各项知识，将实用性、趣味性、理论性充分融合，可以帮助读者尽快跨入无人机的世界。

本书的主要读者是无人机领域的爱好者、从业者和其他行业的无人机应用者或有意应用无人机的那些读者，相关院校和专业的师生也可将此书当作培训教材或辅导教材使用。

图书在版编目（CIP）数据

城堡里学无人机：原理、系统与实现/杨浩编著. —北京：机械工业出版社，2017.9

ISBN 978-7-111-57554-2

I. ①城… II. ①杨… III. ①无人驾驶飞机—基本知识 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 181908 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：丁 诚 责任编辑：丁 诚

责任校对：丁 诚 责任印制：李 飞

北京利丰雅高长城印刷有限公司印刷

2017 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·9.75 印张·252 千字

0001—3500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-57554-2

定价：59.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

序 言

大家好，“无人机中的城堡”是我的笔名，朋友都习惯直接称呼我“城堡”或“MR. 城堡”。我现在广州某大学攻读控制理论与控制工程专业的博士学位，研究方向是无人机控制器设计。平日里，我的主要时间都花在学习和项目上，但一有时间就会在同名知乎专栏与微信公众号中跟大家分享、讨论无人机领域的知识和观点。

在我并不短暂的教育经历中，理论与实践总是被人为分割开，无人机领域也是如此。有些书籍会像教科书一样给出无人机系统在某一学科中的各种公式、定理。还有一些书籍则侧重于小型无人机，特别是四旋翼机型的组装与搭建。但很多问题依然没有得到解答：这些理论在实际系统中是如何应用的？这些公式和实际无人机有着怎样的联系？这样搭建的系统为什么可以运行？为什么可以用这样的方式实现自动控制？等等。从某种意义上而言，对这些问题的忽视造成了理论与实际间的鸿沟。

在我眼中，无人机是一个由各种理论和硬件相互支撑的实际系统，在这个系统中看似枯燥的数学和物理知识发挥了实实在在的作用，而这些又与我们的生活紧密相连。为什么不写一本书和大家一起感受理论知识与工程实践的紧密联系，并把这种联系带入到我们对无人机或日常工作、生活的理解，以及学习、实践中呢？这正是本书创作的初衷。

希望本书能够帮助读者不只在无人机领域，而是在各行各业中建立起理论与实际系统关系的感触，并通过这种感触来弥合理论与实际间的鸿沟。

感谢读者们的支持与帮助，很多读者通过城堡的专栏和公众号、邮箱、微信等提出了宝贵的建议，从某种意义上来说，这本书是由热心读者与我共同完成的。感谢机械工业出版社丁诚编辑和其他工作人员的付出，本书选材、编辑、校对、印刷等所有环节中都留下了他们辛劳的痕迹。此外感谢远在美国，热爱工作和生活的鸭子哥-王言（知乎 ID: grapeot），他常常利用业余时间游历北美名山大川，为本书封面中提供了高质量图片素材：DJI 便携无人机 Mavic 平面图；樱花盛开的华盛顿大学全景航拍图。最后感谢一直在城堡背后默默付出的妻子，每一次因为工作而看着你睡去时，我心里都充满了愧疚。你的笑容与理解、包容、支持一直是我的不竭动力。

目 录

序 言

第一篇 热 身

第一章 关于本书	2
1.1 一本不仅关于无人机的书	2
1.2 内容的核心是问题	3
1.3 章节介绍	4
1.4 如何使用本书	4
第二章 我与无人机	5
2.1 无人机和哪些职业有关?	5
2.2 这些职业能从无人机获得什么?	6

第二篇 认识无人机

第三章 无人机的故事	14
3.1 什么是无人机	15
3.2 无人机的昨天	15
3.3 数据视角理解当下的无人机	21
第四章 不同类型的无人机与控制方式	27
4.1 固定翼型无人机	27
4.2 直升机型无人机	33
4.3 多旋翼无人机	38
4.4 涵道型无人机	45
4.5 自转旋翼机	50

第三篇 了解无人机

第五章 走入无人机系统	57
5.1 无人机硬件系统结构	58
5.2 飞行控制系统	61
5.3 控制器模块	66
5.4 反馈模块	69
5.5 动力系统	81
5.6 机身	86
5.7 有效负载系统	94
5.8 地面系统	95

5.9 能量单元	97
5.10 设计举例	106
第六章 深入无人机系统	110
6.1 玩转坐标系	111
6.2 坐标系间的数据转换	114
6.3 无人机姿态	117
6.4 多旋翼无人机数学模型	120
6.5 控制的基础概念	128
6.6 无人机控制的算法实现	131
第七章 建议与资源详解	135
7.1 付出与积累	135
7.2 技术与焦虑	137
7.3 工作与生活	139
7.4 基础技能	140
7.5 实用资源	142
结束语	145
附录 词汇表	146
参考文献	150

第一篇

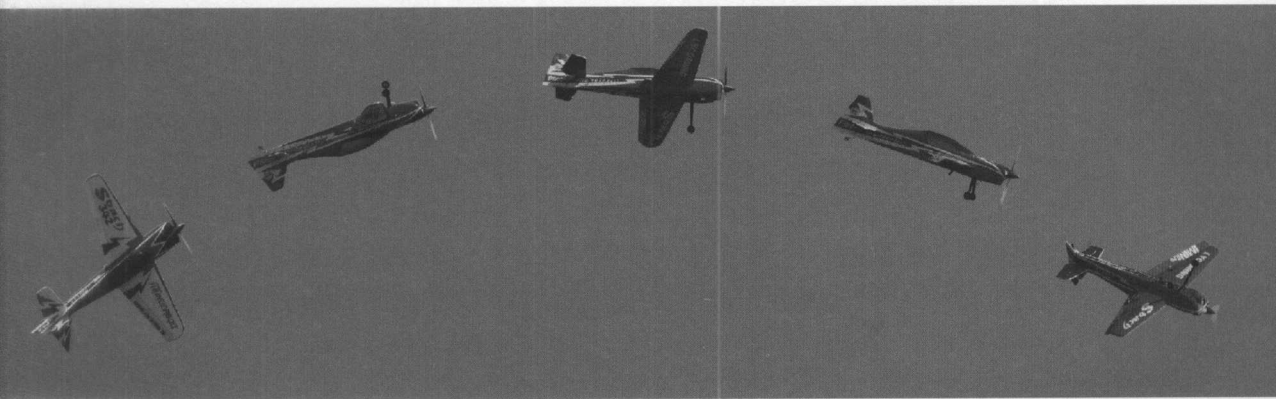


热身

“在正式训练前，我们先进行一些热身活动”，这是城堡以前的篮球教练在训练开始时总会强调的内容。拉伸，慢跑，体转……由于它并不能直接提高篮球技能，仅仅能提高效率，降低受伤风险，被我认为既枯燥又无用的，所以每次训练前的热身活动总是懒懒散散地完成。态度一旦形成习惯就会一直在我们的生命中发挥作用，直到一些“莫名其妙”的伤痛把你打醒，才能让人稍稍收敛。城堡不注意运动前热身的习惯一直延续到高中，直到在一次篮球比赛里扭断了前交叉韧带。

有时我们太急于获取眼前的收益，很容易甚至很愿意忽视一些从长远来讲更有价值的内容。相信各位读者在看到本书时一定带着热切的期盼想尽快走入无人机的世界，掌握各种技能，学习尽可能多的理论。然而本书将用整整一篇来回答下列问题：这是一本什么样的书？这一本书中有哪些内容？如何使用本书？无人机和我有什么关系？

读者可以跳过本篇，进入与无人机直接相关的章节开始阅读，然而作者还是建议大家读完本篇内容之后再进入后续章节。虽然这部分预备内容正如同运动前的热身活动一样，功能仅仅是提高效率，降低风险，但这已经足够重要了。



第一章

关于本书

1.1 一本不仅关于无人机的书

2012年城堡在美国端盘子，美国餐厅里的服务员是与餐桌挂钩的，菜鸟员工一般只负责一两张桌子，老员工或能力强的服务员会被指派负责更多的餐桌，负责餐桌的数量将直接决定收入的多少。因为美国服务员的收入中仅有一小部分来自于餐厅定期支付的时薪，绝大部分来自于顾客的小费。城堡对这份工作是有期盼的，去餐厅打工希望收入至少能抵消日常花费，最好可以有富余给家人和女友买些礼物，因此这份工作的目标从一开始就非常明确：钱。这必须通过负责更多的餐桌，调到更好的工作时间，接待更多的顾客才能实现。

然而城堡的第一份工作竟然是给老员工整理餐桌……这和增加收入没有任何直接关系啊！而且这份工作是如此枯燥乏味：收拾客户吃剩的盘子，擦桌子，摆配料，摆餐具……也许是看到我的工作状态不好，也许只是无意之中，一位同事——大卫，在休息时间走过来对我说：“Yorx（城堡的英文名），你知道这份工作对我而言，最大的吸引力在哪里么？”这个突如其来的问题让我有些不知所措“呃，收入？”“不，我最喜欢能够布置自己的餐桌，你看，虽然这个餐厅不是我的，但是有四张我专门负责的桌子，它们就是我的领地，我的地盘，我就是这四张桌子的……呃，老板（我怀疑他最初是想用‘国王’这个词），我能够把它们布置得很好，然后看着顾客开心地用餐，没有人能在这里对我指手画脚，就是经理也不能。”他说到这里时声音异常洪亮，经理办公室里的人一定听得清清楚楚，“当然，如果搞得不好，破产的也是我，但这正是最有趣的地方，不是吗？”。

大卫的一席话给我带来了许多思考，我开始关注对自己“领地”的照顾，开始注意不同文化的交流方式，开始了解美国餐厅的管理模式，开始与同事们一起出去聚会，享受生活。

我开始理解到同样的一件事情能够获得不同的收益，而这不同之处完全取决于我们对待它的态度，这样的观点让年轻时的我兴奋不已，似乎每一件小事都变为一座宝山，好的寻宝者总能获取更多的收获。

本书是一本关于无人机的书，但希望能够给大家带来的收获不仅仅停留在无人机的范畴，有多少读者的工作与无人机直接相关呢？有多少读者每天都在使用无人机呢？城堡相信不会很多。但是我们每天都会使用与无人机相关的各种知识：物理公式、数学公式、软件程序、算法实现、硬件系统设计等。这些抽象的内容在课本中让我们摸不到头脑，这些公式在实际产品中是如何使用的呢？这些算法对于机器人系统有什么重要作用呢？这些用数学符号拼凑起来的文字如何在工程中实现呢？现在我们有了一架看得见摸得着的无人机，在这个实际的系统中各种力与力矩的公式每时每刻都在发生作用，各种控制算法都通过程序写进了芯片中，并真实地控制着它进行定点飞行、轨迹跟踪、目标识别等等。这些有用的知识都将通过无人

机呈现在我们的面前。

任何一个行业都在不断变化，无人机行业也是如此，新的硬件，新的技术，新的算法，新的实现方式，新的产品模式总会层出不穷，如果我们的收获仅仅停留在当下的无人机技术、产品、工程、算法中，这些知识在未来能有多大的效用呢？并非要否定这些知识的益处，如果我们不知道加减乘除也很难掌握微积分或拓扑学，但是很显然只掌握加减乘除对于学习微积分而言是远远不够的。因此本书将会涉及无人机的原理、技术、算法实现等内容，但更重要的是通过这些来收获更多有着长远价值的内容：如何去理解理论公式？如何在工程项目中使用理论公式？如何通过理论来理解实际系统（比如无人机系统）？如何建立自己的知识体系？如何判断技术的发展方向并做好准备？等等。这些收获并不会随着时间的变化而被淘汰，并能让我们不断改善自己的职业和生活。

1.2 内容的核心是问题

1. 一个令人讨厌的名词：问题

“问题”这两个字往往不被当作正面词汇，当我们说起“他的项目出现问题了”“他这个人有问题”“你到底有什么问题”时是不会感到开心的。我们希望没有“问题”，虽然我们的教育中也在某些方面鼓励学生提问，但这些问题大多不是关于“为什么”，而是关于“怎么解决”。在我们的意识里最好的状态是“没有问题”，问题是要被“消除”的，是要被“解决的”，因此最省力的办法就是不要“提出问题”。

轻松的事情与错误的事情不同，但有趣的是这两者在很多时候是相互吻合的，就好比更加困难的事情往往更有意义，很容易让人联想到尼古拉斯·凯奇著名电影“天气预报员”里的经典台词：“你知不知道：难做的事和应该做的事往往是同一件事？凡是有意义的事都不会容易。成年人的生活里没有容易二字。”

到底是提问题更难呢，还是解决问题更难呢？这可真是一个复杂的哲学问题，但事实上没有人能够解决所有的问题，任何一个老问题的处理都会带来更多的新问题，正如古希腊哲学家芝诺的名言“你知道的越多，你会发现自己不知道的更多”。我们与真理的距离就像圆周率后面不断出现的小数一样永远不能消失，但提问题，却能够让我们不断接近真理。

“发现问题”是任何一个理工科工程师、研究人员、从业人员及在校学生必须重视的技能。缺乏“发现问题”的能力与欲望会在很大程度上限制我们事业的发展。试问如果“没有问题”，那为什么还要创新呢？为什么还要进步呢？为什么还要努力呢？如果我们诚实一些，就会发现这个世界上并不存在“完美”的产品、个人和技术，因此“没有问题”既是懒惰的，又是骄傲的，一个同时具备懒惰和骄傲的个体是无法取得进步的。“提问题”不是前进道路上的绊脚石，而是求索与进步的必经之路。

2. 一道不为填饱肚子的菜肴

在城堡本人接受的教育历程中，老师的角色大多是答案的提供者。这和我们对于书籍的定义与期盼很类似，一本书应该是提供了满满的“答案”，最好能够覆盖很多在看之前都没有考虑过的问题，而且这些答案一定要新颖、简单、明快、直接、可操作性强。现在有了对这一类内容的统一称呼：“干货”。我们喜欢干货就如同我们喜欢快餐一样，吃下去就能填饱肚子，至于有多少最终被排出体外，有多少为身体提供营养？这是另一个问题，问题都是无聊的，还是填饱肚子最要紧。

如果将书看作一道菜肴，城堡看重的不在于能够让大家吃下多少东西来填饱肚子，而在

于最终有多少能够被读者消化吸收，产生有益于成长的营养。“答案”的灌输能够提供满满的饱腹感，而“问题”提出与解答的整个流程更有助于大家对养分的吸收利用。因此本书在后面的所有内容中都会不断抛出问题，有些问题会在对应的章节中给出答案，有些问题需要读者慢慢思考。

希望我们能够在这个快节奏、快收益、快处理的时代中一起感受一下探索的自由和乐趣。

1.3 章节介绍

本书由三篇，共七章组成。

第一篇“热身”侧重挖掘本书对读者的价值。第一章的内容主要关于本书的写作目的，内容核心，内容介绍，使用建议等。第二章着重从职业属性层面构建无人机与读者的关系。

第二篇“认识无人机”从无人机发展历史和不同机型的实际系统出发，帮助大家从最直观的资料中培养对无人机的“感觉”。第三章从无人机历史和数据系统两个视角审视无人机。第四章从机身结构、动力与姿态控制等角度描述固定翼无人机、直升机型无人机、多旋翼无人机、涵道无人机、自转旋翼机等飞行器。

第三篇“了解无人机”结合实例与代码给出硬件系统和开发中使用的理论知识。第五章介绍了无人机系统中常见的硬件组成及各个部分的功能、参数等，并在最后一节结合前述内容给出了小型多旋翼无人机的基本设计流程。第六章介绍无人机系统涉及到的坐标系，姿态描述方法，数学模型，控制概念与控制算法的代码实现等。第七章把视角从无人机延伸至与读者工作、生活、学习相关的内容，其中既包括城堡的个人建议也涵盖对一些工具、资源的介绍。

1.4 如何使用本书

1. 无处不在的问题

本书会在每部分内容的开头、中间、结尾提出数目不一的问题，建议读者在阅读过程中不断思考这些问题，结合书中的内容形成自己的观点，并通过对实际系统的观察、搭建等来体会解答的实现过程，不断丰富自己对无人机的感触，并形成属于自己的答案寻求模式。

2. 讨论与交流

一本好书不应该在读完最后一页后戛然而止，欢迎各位读者在阅读过程中或完成阅读内容后与城堡分享心得，讨论问题，大家可以在知乎或城堡的微信公众号中通过私信或留言的方式将问题提供给城堡。事实上本书的很多内容都是与专栏或公众号读者讨论的结果。

城堡会将好的问题或讨论以具名方式通过专栏文章或者知乎 Live 与更多读者分享，甚至会写入到后续的新书中。传播知识与观点不是某一个人的专利，你、我、他，我们每一个人都有权利与责任让更多人接触到好的观点与想法。

第二章

我与无人机

对于想要考研的本科生而言，最先要面对的是选择自己心仪的学校，这正是六年前城堡不得不面对的难题。那一年正好是城堡与现在的妻子以男女朋友身份交往的第二年。彼时“研究生”对于自己而言意味着什么，其实心里并不清楚，甚至没有太当一回事，感谢四年的大学时光，让我能够一边嘴上说着“好伴侣比好大学重要”，一边偷懒地给自己铺垫一个借口留在本科学校继续研究生学习。这确实省却了很多麻烦，不用换学校，不用收拾杂物用具，不用离开舒适的环境。然而这一切都是要付出代价的，这种代价并不完全取决于学校的性质，而在于我没有认真地对待这个选择，没有思考能从中获取哪些收益。

在我们花费时间去了解无人机系统的相关知识前，不如先回答一下这个问题：无人机与我们有什么关系？或者换一个问法：“我们能够通过无人机获得些什么？”这个问题看上去似乎非常功利，为什么一开始就要谈“获利”呢？难道不能单纯为了“兴趣”“爱好”“梦想”走进无人机行业么？城堡在行业中的很多朋友，甚至城堡本人都非常喜欢无人机，觉得它很酷。但城堡也遇到很多人，将兴趣、爱好、梦想当作“廉价”的答案，用在任何地方，不愿意正视一个现实：这些美好的事物是与代价相关联的，可能是时间，也可能是金钱，也可能是漫长的努力与积累。渐渐地“兴趣”“爱好”“梦想”这类美好的词汇，成了逃避努力与无视付出的借口，因此它们的对象也总是从一个事物跳跃到另一个事物上，今天可能是无人机，明天可能是机器人，后天可能是游戏制作。

城堡想强调的是，任何事物都要有相应的付出才会有收获。不劳而获是不现实，也是不符合客观规律的，甚至导致我们的整个人生在不知不觉的慵懒里消散殆尽。

怎样才能够认真地对待付出呢？首先要从认真对待收益开始。清楚可以通过无人机获得些什么，既可以让我们更有效率地学习、应用相关知识，又可以不断激励我们进行有效的付出，让梦想不仅仅停留在绚丽的辞藻上。

2.1 无人机和哪些职业有关？

无人机可以介入到生活中的每个层面。我们可以在举家出游的过程中使用无人机拍摄留念，也可以在爱好者聚会时带上自己DIY的无人机系统与朋友们分享无人机知识，这些都是我们生活的一部分，然而更容易对我们产生持续激励的是每个人所从事的职业。

对于大多数人而言，工作会占用每天的大部分时间，同时它也是我们主要的收入来源。这意味着工作直接与两项重要资源相连：时间，收入。前者是我们在任何领域深入发展的必需要素，后者是对我们最直接的激励因素（是否是最大的激励可能因人而异）。从爱好出发能够DIY一架无人机，但与职业相连才能保证这架无人机不会积上厚厚的尘土变成我们浪费

时间的铁证。爱好永远是最本质的冲动，但把爱好揉进职业发展中，才会时用时新。

无人机可以对很多职业产生帮助，当我们更深入的思考无人机与自己职业的关系后可以更有效的学习无人机相关知识，同时让自己的事业与先进的技术相联系。如果知识不能在工作中使用，它不会像无人机那样积上尘土，而是会直接从我们头脑中消失。

以下职业或身份的读者，都可以从无人机技术、理论、行业发展中受益：学生、机器人工程师、研究人员、创业者、行业应用者。

2.2 这些职业能从无人机获得什么？

1. 学生



图 2.1 在年轻时能够多读一些有意义的书实在是一件幸福的事情，但幸福的事情往往不容易达成（图片来源：pixabay）

微积分、数学建模、解微分方程、力学定理、动量守恒、空气动力学、控制算法、图像算法等等。城堡相信很多读者可能在高中，大学或者其他阶段中接触过各种各样的理论知识，但那些知识的意义大概只在各种考试中才能得到体现，一旦交完考卷，难免萌生出“从此萧郎是路人”的感慨。既然不知道这些理论知识的意义在哪里，就更别提在工作或生活中使用它们了。长此以往，很有可能只形成了抽象、反感的印象，既无助于已有知识的记忆，也无

助于未来知识的学习、掌握。最终把兴趣、爱好、快乐这些美好的词汇都驱赶到知识的对立面。

学生是一个可大可小的概念，在城堡眼中，不断学习专业领域或者新领域知识的人都可以算作该行业的学生。对于学生而言，最难的未必是“如何去获取知识”，而是“为什么需要这些知识”，获得某种学位或证书后带来的经济激励几乎成了当下社会唯一认可的学习动力，然而多少金钱能够填满心中的欲望呢？当我们通过努力学习获得期望的经济回报后，只会有另一座欲望的高山出现在面前，学习的满足？快乐？也许会出现在童话故事里吧。

为何不把那些数学、物理、控制等理论知识与能在天空中飞翔的智能空中机器人相联系呢？通过无人机来真正使用这些理论，看一看物理学和数学是如何与无人机姿态变化相关联的，深奥的控制算法是如何通过编程语言实现的，看似繁杂的机器人硬件有着什么样的数学本质呢？通过无人机，可以让这些知识不只停留在考卷中，更能够在读者的脑海中形成具体的感知，让理论显现出确实的价值和意义，如此一来还需要什么其他的刺激因素么？赶紧抱着被子去图书馆通宵达旦吧（此处只是一种形容，大家还是要注意身体啊），通过无人机你会发现那些枯燥的知识也是有生命力的。

2. 工程师

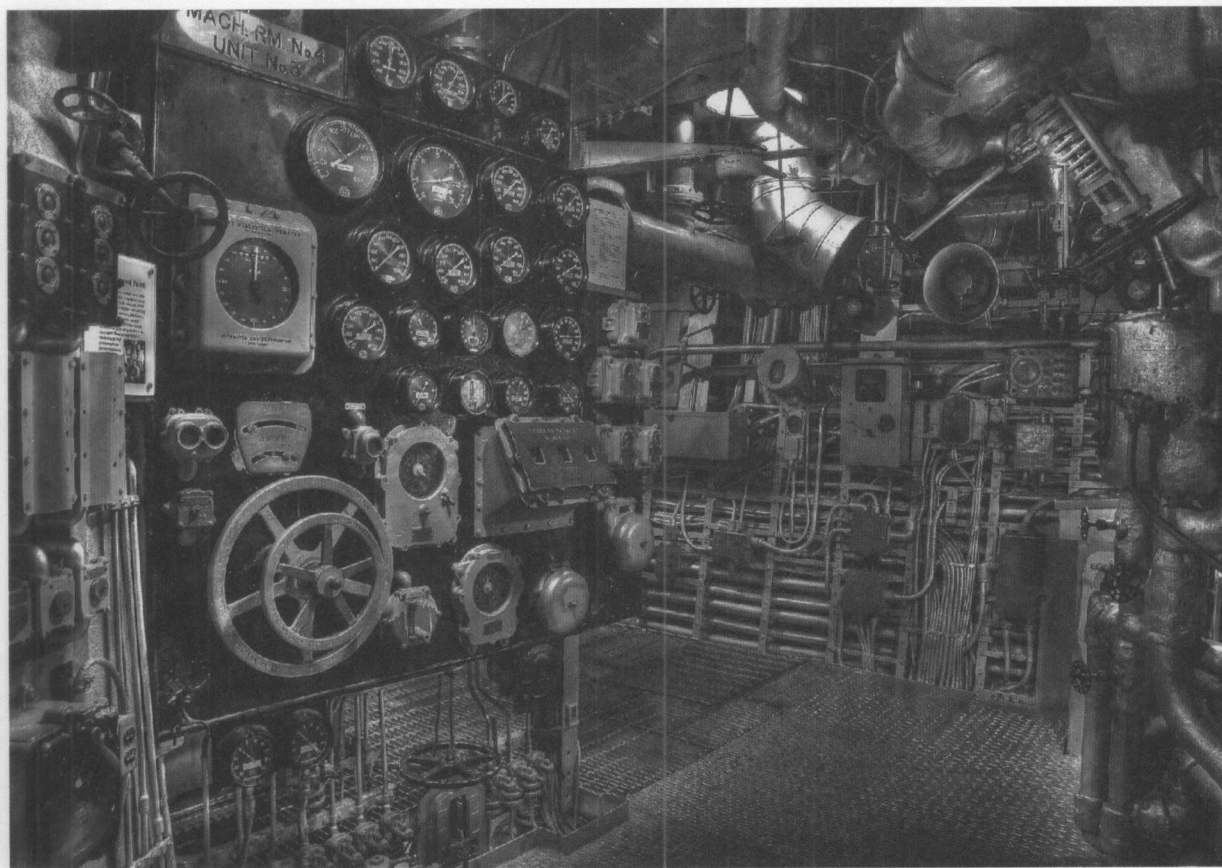


图 2.2 是不是每个工程师都有拆东西的冲动？（图片来源：pixabay）

这里提到的工程师，特别侧重但不限于无人机工程师或者电气、控制领域工程师。

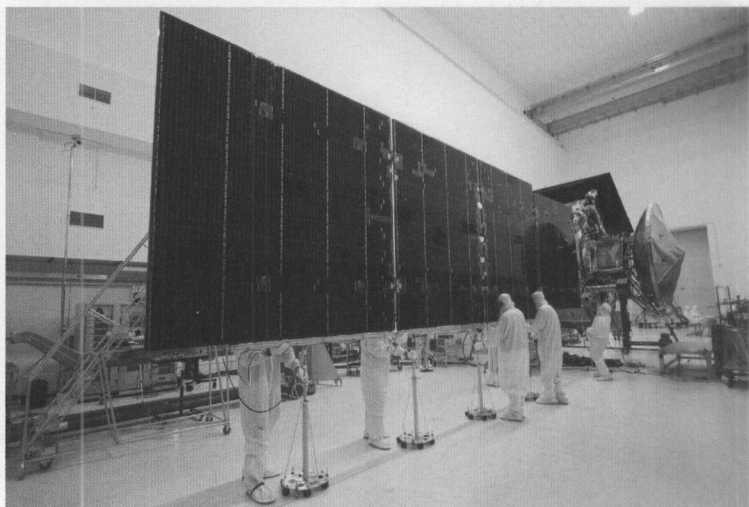
工程师是解决实际项目的高手，对于他们而言，无人机能带来什么呢？无人机系统囊括了机器人领域常见的各种硬件、软件、算法技术，如直流电动机、舵机、电调、伺服电动机、嵌入式控制器、气压计、红外线、超声波、双目视觉设备等，对于任何弱电领域的工程师而言，无人机都是不可多得的实践平台。

无人机技术领域中的开源内容涵盖硬件、软件、算法等多个层面，这些已有的开源资料对于任何领域的工程师而言都是宝贵的工具与资源。而在面对这些开源资料时，如果具备基本的无人机知识则能有效提高工程师对它们的利用效率。同时在将这些开源内容应用在新的平台中或其他领域里时，具备无人机知识的工程师可以降低错误发生率。

工程师喜欢并且擅长解决实际问题，擅于从实际工程中积累经验。然而经验是“不确切”“不全面”的总结，经验性知识在一定时间范围和应用对象中确实很有“效率”，然而由于这种经验来自于已有现象或实际的实验活动，应用范围受当下的时空限制，简单来说，这些经验性知识不具备普遍性。20 世纪之前工程师的经验可能在几十年甚至上百年内都是有效的，因为环境与承载经验的硬件、理论的变化速度没有那么快。然而当下信息时代的技术发展实在是太迅猛了，各种理论、硬件、系统的迭代速度远超以往。这意味着工程师积累经验的环境正被快速更新，工程师经验的不精确性与不全面性在面对高速变化中的环境时会显得力不从心。而物理、数学、控制学等相关内容的有效性、正确性、普遍性则可以有效弥补“经验知识”在这些方面的不足。事实上城堡在行业中遇到的优秀工程师无一例外地注重通过理论与实际经验的结合不断加深自己对行业、技术的预判与了解。可能没有人比优秀的工程师更了解形成快速、实用、精确的“感触”有多么重要了，而在无人机领域我们可以将实践与理论结合起来，用旋转定律分析姿态变化，用数学模型分析飞行现象，用控制算法解读程序代码，用理论与技术形成行业观点，感受理论与工程实践的配合，这样的能力可以用在任何专业技术领域之中。

3. 研究人员

图 2.3 在研究领域中找到合适的研究对象与对应问题是很重要的
(图片来源: pixabay)



对于研究人员而言，找到合适的研究方向或研究对象是非常重要的，最好是交叉学科，因为这样研究的成果就可以应用在更多领域中。而无人机显然是非常值得关注的研究领域或研究平台，它本身就是一个多学科的成果，包含：数学、物理学、控制学、机械制造、电力电子、材料、动力学等等，甚至还包含地理学、建筑学这些与无人机技术无关的行业，都可以在无人机工具平台属性中获得研究的突破。

无人机系统涵盖大量硬件模块，这些硬件涉及众多应用领域，可以为研究者创造出各种实用工具，农业研究者？可以使用！地理测绘研究者？可以使用！安全领域研究者？可以使用！同时无人机系统的算法涉及范围也非常宽广，这两方面的结合使得无人机在交叉领域备受关注。但这些研究内容、工具平台实现是与无人机本身特点、结构、模型、算法、实践等息息相关的，如果研究人员想要在无人机方向上深入，就必须对无人机这个对象及其已有的分析方法具备较为丰富的理解。对于将无人机当作先进工具的研究者，无人机数据的分析也会有助于研究内容的快速推进。付出总是有的，但相比于丰厚的回报，就算不得什么了。

4. 创业者



图 2.4 自信来源于对所处行业的深刻理解（图片来源：pixabay）

创业热潮几年前就已经出现，时至今日也没有一点衰减的迹象，甚至发展成全民创业的趋势。如果说无人机是当下智能硬件创业领域最为火热的行业，应该也并不为过。城堡每次参加行业活动，总能看到新的无人机创业公司。对于创业者而言懂得选择一个有前景的好行业是第一步。但后面还需要脚踏实地深入了解所在行业，这才是成败天平中决定胜负的砝码。

无人机行业是一个优秀的创业领域，但由于它优秀得这样明显也势必导致竞争的加剧。高收益往往与高风险相联系，对无人机领域的创业者而言，与其将精力放在如何提高收益上，不如押在如何规避风险上，优秀的行业本身已经足够带来可观的收益，但其中蕴含的种种风险却常被人们忽视。

任何技术都有它本身的发展规律，未来会有哪些技术应用在无人机领域中呢？无人机在应用行业中的角色定位是怎样的呢？在不断出现的新技术与不断开拓的新应用领域中如何进行选择呢？任何一个选择的背后都隐藏着时间、金钱、人力的投入，一旦方向出现偏差，想要纠正回来就变得非常棘手。尤其是对于智能硬件企业而言，新的系统、技术、产品要在趋势形成之前经历长时间的研发，一旦趋势与预判不吻合，之前的所有努力都会白费，比如无人机系统本身要服务于任务需求，如果任务判断错了，量身定制的系统也就没有价值了，如果要把这样定制的系统应用在其他领域，已经落后别人不说，还不得不付出更多的成本。

无人机行业的硬件范围，算法技术，应用领域都在不断加深，就算是无人机行业中从事专门技术研发工作的工程师或研究人员都不得不时刻面对各种新技术、新硬件、新算法、新应用领域。创业者未必要深入到某项技术或算法中去从专业角度研究无人机，但形成对无人机技术的理解、无人机系统概念的感触、无人机市场本质的把握等无疑是十分重要的。很难想象一个不了解无人机发展历史，系统构成，技术本质的 CEO 做出的预判能与实际趋势相吻合。就算小概率事件发生，幸运地走到了风口前，也只是进一步刺激了投机心理，为将来更大的失败埋下了伏笔。

5. 行业应用者



图 2.5 在类似的行业应用场景中，无人机都有着巨大的技术和成本优势（图片来源：pixabay）

无人机能够与各种行业人士产生紧密的联系，这里所说的行业应用者可以是职业航拍手，可以是精准农业专家，也可以是地理信息系统工程师等等。无人机之所以能与这些专业人士产生关联，主要原因有两点：①无人机平台的工具性；②无人机行业的发展前景。

无人机不只是为了满足爱好而产生，它是为了完成某些特定任务而设计的空中机器人。因此这些“特定任务”可能就会涉及到各位读者所在的领域。比如无人机被应用在安保、农业、测绘等行业时，这些领域的技术专家都可以结合无人机平台设计更加高效的方案，而这种趋势在很多领域都已展现出来。无人机可以作为执行平台来使用，但更多是被应用于数据获取领域，无人机作为传感器平台，可以在合适的高度中搭载相对廉价的传感器以及数据收发设备，高效率、低成本、高质量地实现各种数据采集，并将数据传输回地面设备。无人机所能够采集的数据量和数据质量是地面机器人难以比拟的，同时它的采集成本相对于卫星系统而言简直微不足道。如果作为某个领域中的专业人士，能够具备一定的无人机知识，无疑会非常有助于在所处领域中的职业发展。

无人机是一个朝阳产业，作为智能机器人的分支，具有非常广阔的应用前景。城堡已经见到很多朋友从其他行业转入无人机领域并做得风生水起，因此具备相关的无人机知识，未尝不是在一个有前景的行业为自己事业埋下伏笔的明智之举。

6. 爱好者

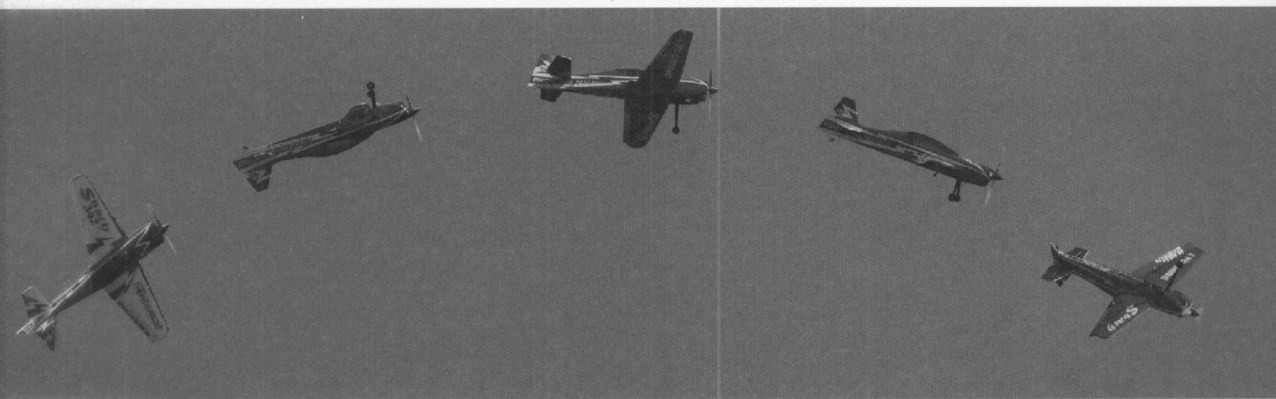


图 2.6 技术、效率、成本等等这些都是我们使用无人机的理由，但对于爱好者而言，可以去“喜欢”的原因就更多了。每个领域的爱好者都可以令该领域的价值更加多样性（图片来源：pixabay）

对于真正的爱好者而言，无须增加额外动力，因为他们已经可以从喜欢的无人机中收获足够的快乐与满足感，被这些感受刺激而产生的多巴胺会驱使爱好者投入到无人机事业中来。在某种程度上，优秀的无人机从业者一定是无人机爱好者。如果前述职业的动力不包含爱好因素，那么在这个职业里待得越久可能收获的快乐反而更少。

然而城堡在这里要提醒爱好者的是，有时我们会过分专注于眼下的快乐与成果，竭尽全力从中获取快乐与满足，这本身并没有任何不好，只是如果爱好者能够从当下抽身出来，设

计自己在喜爱领域中的前进与发展方向，无疑是对未来更多快乐的投资。我们可以因为爱好蓝天与无人机而进入某一个职业，也可以因为喜欢无人机中的某个元素，比如自动驾驶，跟随避障功能等等，这些都可以与我们的职业发展，知识体系构建产生直接关联。透过无人机，更加深入到技术与原理中，有可能挖掘出更多以前没有注意到的兴趣点，并将爱好变成每天的事业，很难想象出还有比这更幸福的事情了。

因此对于爱好者而言，良好的计划和知识储备可以让爱好者在无人机中挖掘出更多的快乐。

认识无人机

对于博士学习而言，论文的阅读和撰写是必不可少的环节，还没有进入“正题”就要在前言部分尽可能多地罗列前人研究成果，分析它们解决了哪些问题，留下了哪些问题，又带来了哪些新问题，对这些成果进行归纳、比较、区分之后还要写出自己观点与上述内容的区别，解决了哪些问题，有什么独特性等等。

最初城堡对这些内容是非常头疼的，研究一个新的对象已经花去大量时间，还要“额外”应付这些“陈芝麻烂谷子”，实在是费力的事情。相比于花时间理清研究对象的整个理论历史，在某个方向上取得突破显得更有吸引力。因此，找到一两篇合适的论文，选择有“前景”的研究方向进行快速推进不是更好的选择么？城堡在一开始也是这么做的。

可随着研究的深入，不断产生新的问题，以至于计算、推导、分析了半天还要回到一些基本的问题上：这个算法有什么特点？它的本质是什么呢？它和控制对象之间的关系是如何产生的？相比于其他算法有什么优势和劣势？最终不得不在花费了大把时间后重新阅读基础文献，一步一步建立对控制对象和算法的认识与理解。

我们每一个人对某项事物的认识都会受到所处时代以及个人经历的限制，然而这些事物并非当下才出现的，它的最终形态也不会仅仅停留在我们现在看到的外形、系统等各种表现形式上，因此形成对某种事物的完整认识是要花费时间和精力。对于无人机而言也是如此。

很多读者第一次接触无人机是2012年以后的事情，看到的产品往往是挂载着相机的多旋翼型无人机，应用场合一般是航拍领域，因此很容易形成“无人机等于多旋翼机”“无人机等于具备悬停功能的机器人”“相机、云台是无人机的必备有效负载”等等。但无人机本身有着漫长而丰富的发展历史，那些曾经出现过的“无人机产品”并不拘泥于我们眼下看到的形式，未来的无人机产品、技术发展也不会局限在现有的表现形式上。我们很看重对于未来的预测和判断，但容易忽视掉“历史”的重要性，一旦舍弃历史来分析判断未来就会让整个判断的根基仅仅建立在当下的认知水平上，很难保证经得起时间的考验。

因此在本篇中，我们将通过两个章节，分别从无人机的历史与无人机的机型特点及控制方式出发，帮助读者构建从整体到飞行器个体的立体感知，请读者在阅读中特别思考以下问题：

- a. 具备自动驾驶功能的无人机是在哪些技术实现后出现的？
- b. 无人机曾经被用来做什么？为什么在这种情况下使用无人机？
- c. 在我的使用中或者我看到的无人机应用场景里，用无人机完成了哪些任务？
- d. 在这些任务中无人机本质的作用是什么？
- e. 不同无人机机型在历史上的出现顺序是怎样的？为什么会有这样的顺序？
- f. 如果在我的工作或感兴趣的应用领域中使用无人机，应该如何选择合适的机型？

第三章

无人机的故事



图 3.1 1988 年的移动电话（图片来源：pixabay）

20 世纪 90 年代商务精英标配大哥大和 BP 机，千禧年后出现了“手机”这个词，功能上实现了大哥大与 BP 机的结合：Dial + Massage。之后手机的结构实现了从按键到键盘再到触屏的变化过程，现如今哪款手机没有操作系统，没有 APP，没有网络功能都不敢加上“手机”二字。对于手机概念的理解不同，技术与产品方向也会不同。在看似明确的变化过程中已有无数企业灰飞烟灭。

无人机的书籍怎么插播了一段手机介绍？手机是大家很熟悉的电子消费品，但就是这么熟悉的电子产品于短短 20 年中，在功能、系统结构、硬件组成、使用方式等各个方面都发生了翻天覆地的变化。无人机不如手机普及，进入消费类电子产品领域的时间也远远短于手机。这就意味着无人机可能（一定！）会在功能、系统结构、硬件组成、使用方式等方面发生各种变化。因此对于无人机知识的学习，行业的理解，市场的掌控都必然面临非常大的时间局

限性。这意味着我们很难通过已有的技术、产品、系统来把握无人机的本质，我们在当下获取的一切知识都可能在未来变得面目全非甚至被完全推翻。

因此形成对无人机系统、历史、硬件、技术、应用领域等领域的了解非常重要。“存在必合理”，从已有的无人机发展过程来探寻无人机系统发展的客观规律，并形成自己对于无人机系统的感触，再将这种感触建立在后续的各种技术、硬件、算法之上，才能对未来的发展形成正确合理的判断。

3.1 什么是无人机

“城堡是不是太小看人啦？无人机是什么还需要说么？”一提起无人机来，脑海中马上闪过很多画面，尤其是在无人机概念异常火爆的今天，相信大家对无人机系统还是有一定印象的。

那么图 3.2 中的飞行器是不是无人机呢？

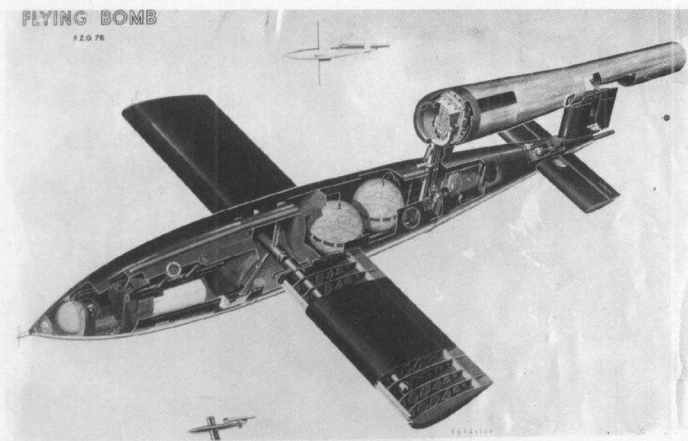


图 3.2 这是一张非常有名的图片，它是第二次世界大战 V1 导弹的剖视图。从中我们可以体会到不同定义之间的边界有时是非常模糊的（图片来源：美国空军）

看样子很像固定翼飞机？实际上它是二战时期大名鼎鼎的德国 V1 导弹。那么这样子的导弹是否算作无人机呢？

中文“无人机”一词译自英文词汇“UAV (Unmanned Aerial Vehicles)”，按照该词，无人机可以理解为：无人驾驶空中飞行器。这里的“无人驾驶”并不是指完全没有人为操控或监控，无论 UAV 能够飞行多远还是需要操作者的监控与远程控制范围下。因此“无人驾驶”更多是指无须在飞行器上配备驾驶人员就可以实现远程或自动、自主控制。大家经常会看到另外一个描述无人机的英文词汇：“Drone”，该词汇在英文中用于表现“雄性蜜蜂 (male honey bees)”飞行的嗡嗡声，最终演变为特指雄性蜜蜂的专用名称，并以此代指无人机突出其远程控制的特点。（请思考问题：在你眼中无人机应该如何定义？你为什么这样定义无人机？）

这下我们可以对无人机进行较为明确的理解了：无人机 (UAV、Drone) 是一种通过远程指令控制实现无人驾驶的空中飞行器。（请思考问题：人在无人机系统中的位置应该是怎么样的？）

3.2 无人机的昨天

虽然作为大众电子消费品的无人机出现时间很短，但关于它的故事可是有些年头了。

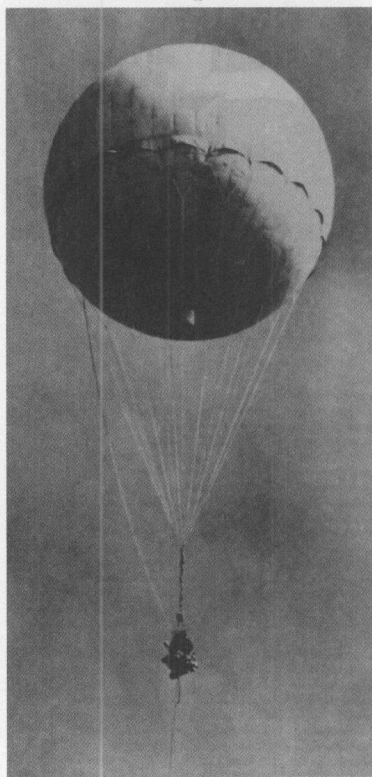


图 3.3 二战时期日本战犯荒川秀俊设计的气球炸弹（图片来源：维基百科）

无人机很早就开始了自己的军旅生活，并在其中渡过了自己的大部分时光。1849 年奥地利人用气球炸弹袭击过威尼斯，只是这种气球炸弹由于不能远程控制也无法实现真正意义上的“驾驶”，只能算作无人机的年轻小表弟，但空中无人设备（奇怪的名字）自此已经开始出现在实际应用中。

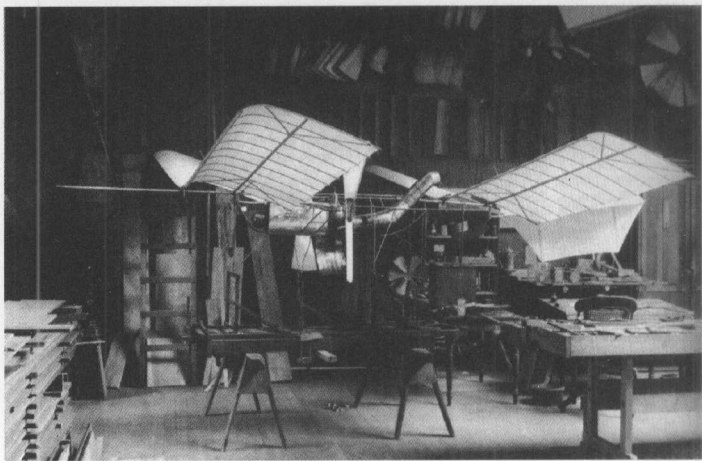


图 3.4 作为第一架无人驾驶固定翼飞行器，Aerodrome 几乎出现在所有论述无人机的资料中。该图为原飞行器 1 : 4 比例模型，拍摄于 1903 年 8 月 8 日（图片来源：维基百科）

1896 年 5 月 6 日塞缪尔·皮尔庞特·兰利（Samuel Pierpont Langley）在华盛顿附近的波托马克河上采用弹射系统进行了自己设计的“Aerodrome”（没错，是“drome”）飞机模型试飞。虽然它也无法进行“无人机飞行控制”，但相比于气球小表弟而言更加接近现代固定翼无人机的气动外形，而且它所采用的弹射系统也成为当今固定翼无人机的主要起飞方式之一。

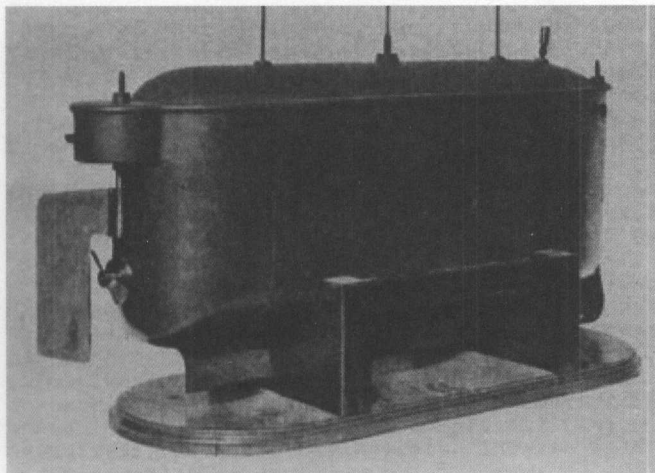


图 3.5 特斯拉对时代的超越性在自动控制领域也有展现，上为 Teleautomaton (图片来源：维基百科)

1898 年，“了不起的特斯拉”（Nikola Tesla）在一艘名为“Teleautomaton”的船上实现了无线电远程控制（Remote Control）。而当时人们以为特斯拉是通过猴子或者心灵感应来操控小船。虽然无线电远程控制被用在飞行器上还要等到 1917 年的“拉什顿·普罗科特”出现，但无论如何，远程控制至此终于从“心灵感应”与“猴子控制”变为了技术现实。

19 世纪末期，人类已经掌握了无人机所需要的固定翼外形、起飞弹射系统、远程控制技术，只差空中自动驾驶系统了。这时，值得我们记住的一对美国父子出现了：老斯佩里（Elmer Ambrose Sperry）和小斯佩里（Lawrence Burst Sperry）。1909 年，老斯佩里成功研发了飞行器陀螺仪，小斯佩里随后使用陀螺仪设计了第一台自动驾驶仪并于 1914 年实现飞行验证。父子斯佩里在无人机的发展中占有举足轻重的地位，因为正是他们第一次实现了真正意义上的无人机控制系统反馈环节。他们所献出的不仅是自己的辛劳，小斯佩里在 1923 年底，横渡英吉利海峡的飞行过程中遇难。（请思考问题：为什么自动驾驶需要这些设备？这些设备的原理与哪些物理知识相关？）

至此无人机所需要的所有技术组成部分都已完成（请读者特别从历史中注意无人机系统实现过程中的技术构成要素积累）。“万事俱备只欠战争”，“还好”人类好斗的本性不会让无人机等得太久。

在第一次世界大战中，美国于 1918 年成功研发了“凯特琳虫”（Kettering Bug）双翼无人飞行器。大家可别以为它真是“小虫”，它由前文提到的老斯佩里设计，翼展 4 米，可携带 85 千克左右的炸药，自动导航飞行距离达 64~120 千米。其系统结构设计中，通过陀螺仪和膜盒式气压表调整姿态与高度。可是这么远的距离，没有卫星系统如何实现远程定位和投弹操作呢？老斯佩里早为大家想好了，技术人员需要根据目标距离设置发动机转数，然后如果能够顺利飞过去，当达到发动机转数后就会坠落式投弹。听上去是不是“脑洞大开”？确实，当时美军参谋认为这个小虫子给己方部队及盟友造成的威胁不亚于对敌军的威胁，因

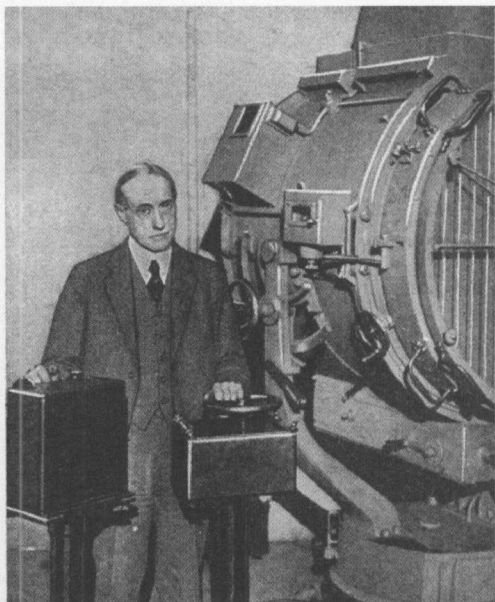


图 3.6 老斯佩里 (图片来源：Popular Science Magazine, jun. 1920)

此只生产了 45 架且从未投入实战。(请思考问题：如果你是凯特琳虫的工程师，整个设计流程应该怎样实现?)

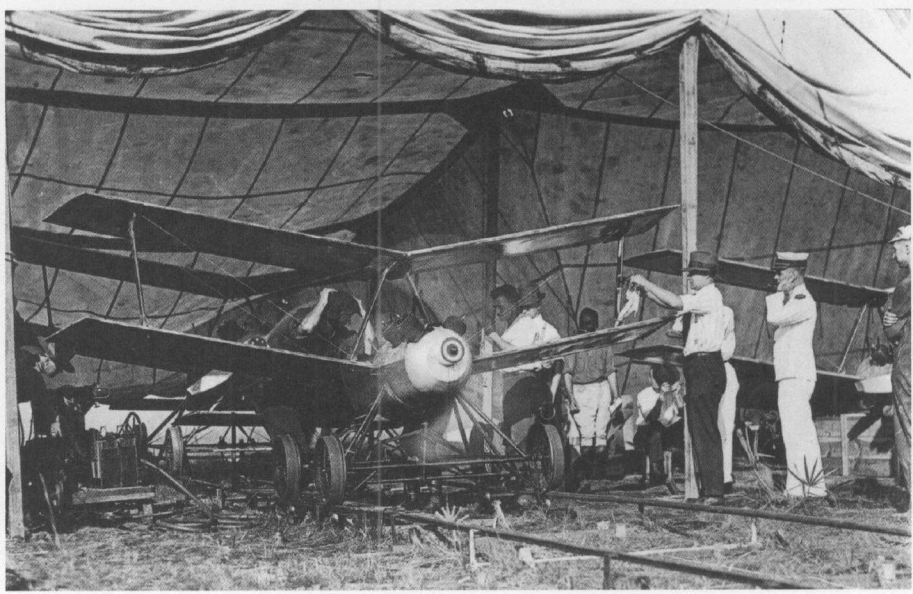


图 3.7 凯特琳虫原型机 (图片来源：美国空军博物馆)

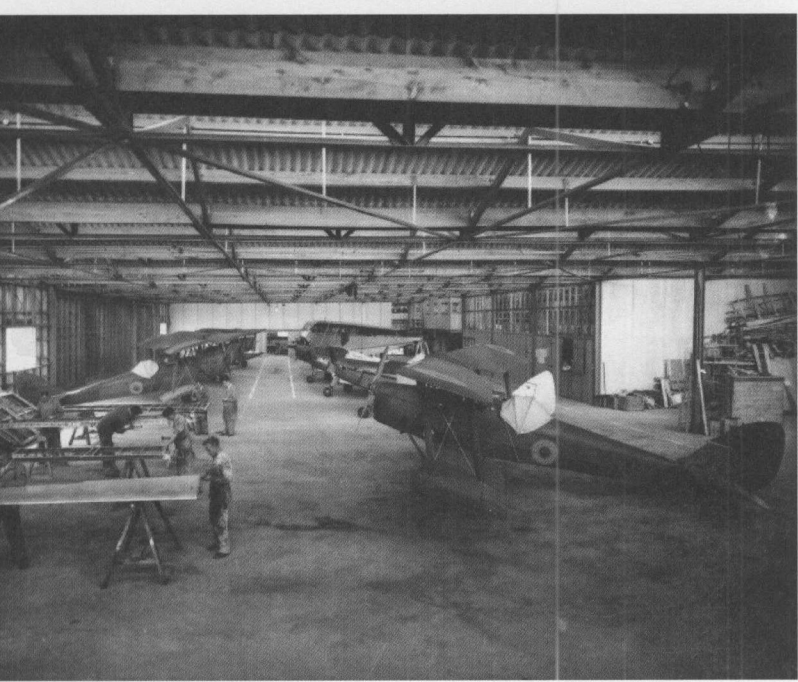


图 3.8 新西兰皇家空军的虎蛾双翼飞机，将老旧飞机改装为靶机可以看做对产品价值的深度挖掘，其中的技术条件与思维条件都很重要 (图片来源：新西兰国家图书馆)

1918 年 11 月 11 日第一次世界大战结束，虽然由于自动驾驶技术还处于初级阶段，无人机并没有在一战中发挥直接作用，但它的价值已经引起了军方人员的注意。在第二次世界大战前，随着无线电射频发射技术的进步，采用无线电遥控操作的靶机被大量生产，一战与二战之间生产的靶机有 12000 多架，其中比较有名的如英国将老旧的“虎蛾 (Tiger Moth)”双翼飞机改造为“女王蜂 (Queen Bee)”靶机，着实省去了很多维护成本。

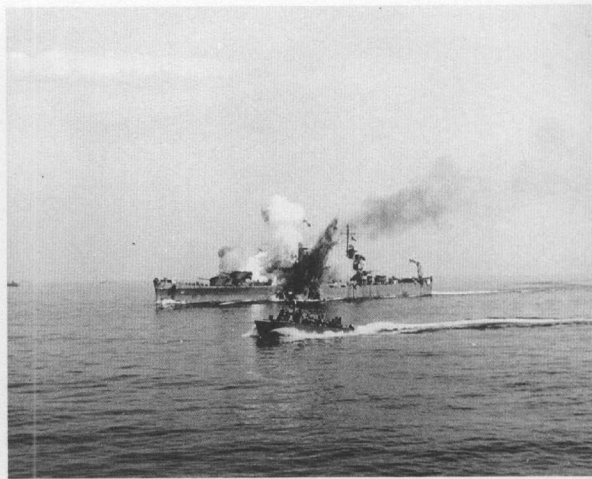


图 3.9 战绩颇丰的 Fritz X 炸弹与其击沉罗马号的瞬间 (图片来源: 维基百科)

在第二次世界大战中, 无人机开始真正投入战场。在无人机的军事应用方面, 纳粹德国有着相当建树, 如 1943 年 7 月击沉罗马号战列舰的无线电遥控炸弹“弗里茨 X (Fritz X)”, 还有大名鼎鼎的 V1 导弹, 翼展 6 米, 长约 7.9 米, 能够携带 850 千克炸药以 600 千米/小时飞行 200 千米, 以及后来性能更加“卓越”的 V2 导弹。



图 3.10 携带空投鱼雷的洲际 TDR-1 攻击无人机, 它的图像反馈系统体现了工程实现的灵活性 (图片来源: 美国海军)

盟军在无人机领域也有探索, 比如著名的 TDR-1 攻击型无人机, 该无人机由“洲际”飞机改装而成, 需要一架护卫机跟随实现远程控制。护卫机中的控制人员通过 TDR-1 上所搭电视摄像机传回的图像进行操作。美国的“阿佛洛狄特计划”中, 将 B-17 轰炸机改装为无人机, 采用类似的控制方式对纳粹德国 V1 发射架进行打击。然而该无人机需要飞行员登上飞机, 在飞行中完成炸弹设置工作后跳伞离开, 这样的操作模式对于飞行员有着一定的危险性, 肯尼迪家族长子约瑟夫·肯尼迪就在 1944 年执行任务时遇难。无人机此时实现了通过反馈更多类型的数据信息实现远程控制。(请思考问题: 到现在为止, 无人机可以通过设备反馈哪些类型的数据? 这些数据有什么作用?)

第二次世界大战结束后, 随着冷战的开启, 及众多局部战争的需求, 无人机在靶机, 侦察机等领域继续发挥着重要作用。如冷战时期通过“战术无人机 (无人侦察机)”带回前方照片, 协助情报搜集或炮兵定位, 比较有名的如美国特里达因·瑞安飞机公司生产的 147BQM-34 或称“萤火虫”无人侦察机, “火蜂”系列靶机; 法国的 CT-10、CT-20、R20 小型战术无人机等等。



图 3.11 两幅图中的无人机都是火蜂无人靶机，左边是 BQM-34F 型陆地起飞的图片，右边为挂载于洛克希德 DC-130 飞机的 BQM-34S 型，它们可以从机翼“发射”出去。这两幅图展示了无人机设计的灵活性（图片来源：美国海军）

这个时期也不只是固定翼无人机一种，随着军队需求的推进，无人机机型也开始发生变化。如 20 世纪 80 年代，美国海军陆战队需要空中远程遥控装置（AROD）实现空中侦察和监视。桑迪亚国家实验室按要求开发出具备 VTOL（垂直起降）能力的首款涵道飞行器，该项目受限于当时的飞行控制技术，于 20 世纪 90 年代终止，但这个项目最终演变为我们日后见到的涵道类无人机，比如霍尼韦尔公司的 RQ-16。

图 3.12 飞行中的全球鹰无人机
（图片来源：NASA）



2001 年“911 事件”之后，美国进入反恐战争时期，此时无人机从战术侦察，诱饵迷惑等辅助任务向目标斩首等“侦打一体化”系统转变，比较有名的如安装美国通用原子公司 MALE（Medium Altitude Long Endurance）无人机系统的“掠食者”无人机以及与其相对的 HALE（High Altitude Long Term Endurance）无人机系统如诺斯罗普·格鲁曼公司的 RQ-4“全球鹰”无人机。

在 21 世纪，随着 MEMS（微机电系统）技术的发展，便携式无人机开始出现在人们的视野中，毫米级别的气压计、加速度计、控制芯片为无人机小型化提供了前提条件。与动辄几米长的大型无人机相比，这些小玩意更加容易隐蔽与携带。这类产品比较著名的如美国天空环境公司研发的 RQ-11“渡鸦”小型固定翼无人机，翼展只有不到 1.5 米，飞行范围 10 千米以内，重量在 2 千克左右，并且无须弹射。

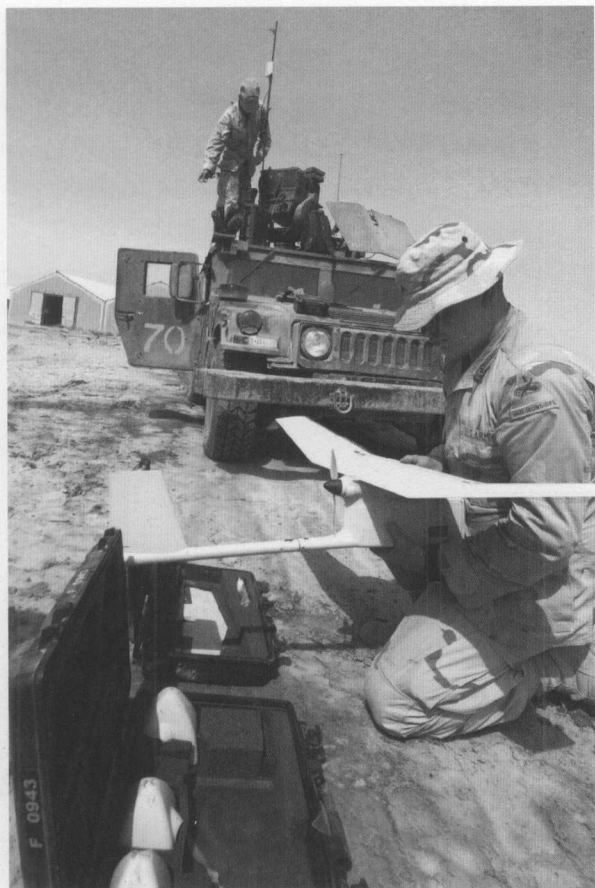


图 3.13 军事行动中的 RQ-11 渡鸦无人机，从图中我们可以看到该无人机执行任务时需要携带的配件种类与数量（图片来源：美国空军）

电子器件成本的降低与硬件功能的提升，使得诸如 Ardupilot 这样的开源项目能够出现并在互联网上快速传播，这令无人机走进了更多人的生活。无人机的技术、算法不再停留于公司、实验室或少数科研人员手里，而是能够接触到众多的爱好者、工作者和创业者。在这些开放的软件、硬件资料中，无人机行业内外人士都可以上传、下载相关代码、硬件电路设计图等内容，参与的便捷性使无人机在自动驾驶技术上取得了快速发展，也形成了众多开源飞行控制方案，如 MWC、APM、Ardupilot、Pixhawk 等等。这种开放的精神让无数有需求的人受益，无人机很有可能是第一个实现真正意义上大规模开源的智能硬件行业。（请思考问题：为什么采用开源模式？你知道哪些国产开源飞控？）

3.3 数据视角理解当下的无人机

无人机可以归入智能空中机器人系统，设计要根据任务需求进行。但不同行业对于无人机系统的要求在结构设计、硬件系统组成、控制算法设计与功能设计、动力结构设计等方面各不相同。因此从无人机的视角去感触无人机本身是很有难度的，比如在航拍与精准农业中对无人机的使用需求在硬件系统、算法实现上完全不同。如何在不同行业中把握无人机本质的内涵和属性，这是对无人机形成有效理解的核心内容之一。

请和城堡一同脑洞大开，想象如下场景：在你眼前有一架小型无人机，外形炫酷，设计新颖，可实现快速飞行中的精准避障，续航时间超过 24 小时，口袋尺寸便于携带，定位与姿态控制完全支持在一枚硬币上进行垂直起降，除此之外还能完成各种智能飞行任务……但是，没有摄像头，没有激光扫描设备，换句话说，无人机采集的全部数据只能用于无人机自身飞行控制，

不会有任何数据传回。

当然，上面的场景仅是假设，如果在市场上或者某个极客手里有一架这么棒的无人机，马上就会被各种商家用来搭载各种设备，想方设法传回各种数据，这又进一步论证了我们马上要揭示的观点：无人机的价值可以通过无人机本身体现（如作为执行器或运载平台），但它的主要价值（尤其对于当下火爆的消费级无人机产品而言）是通过数据体现的。

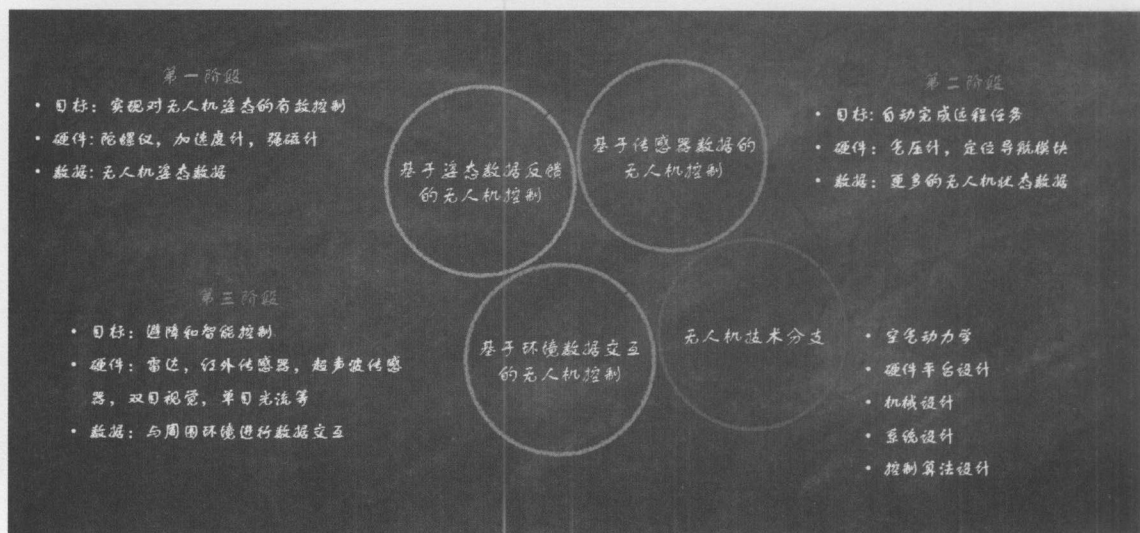


图 3.14 无人机技术发展的三个阶段。无人机技术及发展在各个方面都具有很强的灵活性，读者无须强记某些内容，但可以结合这些内容形成自己的理解

无人机技术发展过程可以粗略地分为三个阶段。第一个阶段通过陀螺仪、加速度计、气压计、强磁计等硬件反馈无人机内环状态，从而实现对无人机本身姿态的有效控制。随着硬件（主要是传感器及控制芯片）技术的发展，硬件模块性能的提高，成本的降低等，无人机控制系统涵盖的硬件范围不断外扩，在加入 GPS 模块后无人机可以反馈回外环的位置和速度等状态信息，实现自动导航等飞行任务。在第三个阶段无人机通过红外，超声波等硬件结合原有硬件系统进行数据融合实现无人机与周围环境的相对状态信息反馈与控制。现阶段或正在发展的阶段（局限在消费产品领域，很多硬件已经在实验室中存在很久了）是无人机通过更多传感器如双目摄像头，单目系统等反馈回更多类型的数据，使得无人机可以通过更多方式与周围的环境进行互动，为无人机编队，智能控制等提供数据支持。（请思考问题：上一节历史上的无人机都处在哪些阶段中？）

上面的视角将无人机技术全部集中在“无人机”这个对象上，“无人机技术不针对无人机还针对谁呢？”，但正如前面举出的例子，大多数的任务需求却不止是为了控制好无人机，而是要实现应用行业的真正“价值”。（请思考问题：在你的职业领域中，核心价值是什么？）

无人机应用在航拍或者军事侦察领域中，是通过其携带的对应硬件如摄像头，照相机等传回的各种数据来实现任务价值的。这样的例子非常多，如测绘领域，消防安保等等，从这些行业需求的实现过程中可以看出，任务的核心不是针对无人机本身，而是通过无人机的平台作用，搭载着各种任务需求的硬件获取数据。试想一下，我们可以采用相同的无人机设计，却可以选择搭载相机或者烟雾探测器来用于航拍与消防两个完全不同的应用领域。因此有观点将无人机看作硬件传感器平台，通过搭载不同的硬件来实现任务需求。

这样的观点把我们带进了无人机系统的视角，无人机作为平台与所搭载的硬件构成了一个系统，无人机提供各个硬件进行数据采集的环境，并通过自动飞行功能保证高效、高质量、低成本的实现相应的数据采集。同时采集回来的数据可以被传回使用，也可以提供给无人机平台进行飞行控制。

然而这样的系统构建依然是以无人机为核心进行的，可是真正起决定作用的是行业任务的需求，无论是在航拍还是消防数据探测还是安保应用中，承载任务价值的都是采集到的数据，即便是在无人机当作执行器的任务如植保农药喷洒，数据也是无人机能够智能完成任务的决定性因素。

从数据的角度构建整个无人机系统会给无人机设计带来什么样的颠覆呢？这样的视角将无人机系统提升到了数据系统的高度，在更高的层面上考量系统架构、系统组成、算法设计等各个部分。

前端的无人机	数据传输通路	数据处理	数据展示
<ul style="list-style-type: none">• 摄像头• 近红外相机• 热成像相机• 辐射激光测距设备• 烟雾传感器等	<ul style="list-style-type: none">• 数据传输设备• 图像传输设备• 数据通路系统• 各类地面站终端等	<ul style="list-style-type: none">• 滤波算法• 数据优化算法• 在线辨识算法• 在线规划算法• 学习类算法• 线下数据挖掘等	<ul style="list-style-type: none">• 数字照片• 数字视频• 地理信息• 全息影像等

图 3.15 数据系统各部分对应硬件、技术举例

当我们把无人机纳入到数据系统的范围内，可以发现无人机只在前端出现，通过无人机平台实现数据的采集，这意味着整个系统的范围从数据采集一个方面延伸到数据传递、数据处理、新数据的生成与分析等多个方面。这样的系统架构使得整个系统的设计重点更加明确。

如此一来会不会造成对无人机本身的忽视呢？这个问题可以从两个方面回答：一方面通过数据系统，无人机的价值得到了更好的体现。无人机通过数据这个核心内容可以介入到成百上千的行业中，如精准农业、地理测绘、建筑行业、医疗卫生、消防安保等。未必在每个行业中都需要一个智能执行器，但任何行业都需要大量、高效的数据采集，而无人机让这一切变为可能，从而实现了无人机价值的飞跃。另一方面这样的系统架构能够实现设计过程中无人机技术与行业技术的解耦，将无人机技术从行业技术中剥离开。这样的结果一来在本质上实现了无人机技术的再次专业分工，让不同的技术团队更有效率地专注在独立研发领域中。同时，这样的剥离有助于创业公司形成对无人机行业的深刻理解，从而更好地实现企业定位，挖掘创新资源。很多无人机创业公司一上来就要做整机研发，看上去好像很光鲜亮丽，但实质上却增加了风险，降低了有效收益是很不明智的。对无人机行业技术的“解耦”，可以让创业者挖掘出更多的商业模式，技术创新机遇。

解释行业现象

如果将无人机看作整个系统的核心，就很难解释行业中出现的一些有趣现象。Intel 和腾讯这类几年前毫无兴趣生产自己无人机产品的企业，却分别推出了与自己相关的无人机产品：“Typhoon H”与“影”。

如果说小米这样多硬件领域布局企业进入无人机市场大家已经见怪不怪，对于腾讯而言（腾讯对于硬件的涉足实在屈指可数），与无人机厂商合作发布自己的产品有什么用意呢？另外一些互联网巨头，虽然还没有推出自己的无人机产品，却已经与无人机行业产生过不少互动，比如 Facebook、谷歌等。还有很多其他领域中的巨头如亚马逊、京东等也早已布局无人机行业。

如果将无人机系统仅仅围绕着无人机本身这样一个空中智能机器人来建立，就很难解释上述行业现象。换一个角度，从数据系统的视角来看，一切就会显得非常清晰。Intel 可以通过无人机构建一个以 Real Sense Tec 或其他技术为核心的一体化系统。腾讯与 Facebook 通过无人机可以从更多场合获取图片数据、影像数据，并快速转化为社交数据。这样重新理解行业行为对于企业和创业者的行业预判有着非常大的助益。

带来更多机会

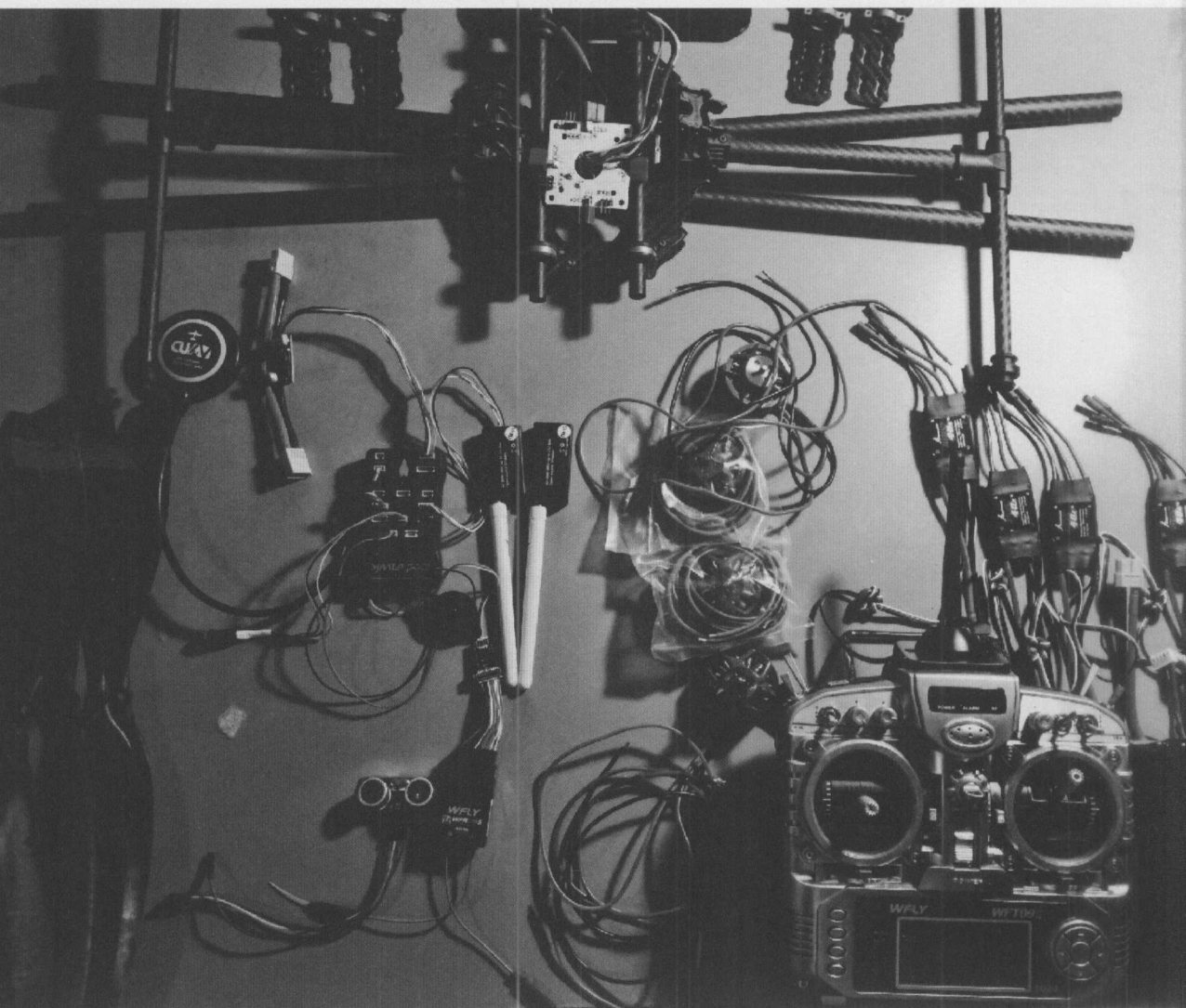


图 3.16 无人机的部件、配件非常多，每一个环节都存在风险、成本与机遇

将无人机作为核心来看待无人机行业，对于企业或创业者而言，重心会更多地集中在生产出好的无人机产品上。然而无人机产业链很长，一款无人机产品涉及到的硬件非常多，一个被消费者接受的无人机产品对于整机质量，性能稳定等有着很高的要求（这也是众多无人机众筹项目频频拖延或失败的重要原因）。而在当下的市场环境中如果想推出一款明星产品，集聚技术的广度与深度并兼具稳定性等是非常困难的。这都会转化为高成本——时间成本，经济成本，信誉成本，管理成本，人力成本……其中任何一项单独拿出来都可以拖垮一个初创企业，本来具备的某一突出技术优势却被各种成本拉低，即使是实力强大的企业或团队也只能面对被淘汰的残酷现实。

以数据为核心构建的系统，其应用范围比无人机要大出很多，给眼光独到的创业者带来几乎无限的行业实现可能。因此创业者有必要形成对无人机行业的正确理解，寻找适合自己的行业位置，判断有价值的技术方向并全力投入，这样既降低了成本，提高了效率，又增加了合作机遇，降低了竞争风险，无人机行业不止需要一个类型的企业。

创造更多价值



图 3.17 高度与美景相辅相成，缺一不可（图片来源：pixabay）

古人云“登高望远”，登高固然有益，但“望远”带来了“登高”更多意境，如果没有值得远望的壮丽美景，登高也就只是纯粹的身体锻炼了。在无人机领域中，正是数据让整个无人机系统有了切实的落脚点，如航拍应用中大家当然关注无人机本身具备什么功能，但核心是该无人机产品能否提供高质量的图像、影像数据。换一句话来说，数据质量是判断很多无人机系统价值的重要指标。

以数据为核心不是淡化无人机本身的作用与意义，相反会释放出更多无人机行业的创造性与生存机会。正是“落霞与孤鹜齐飞，秋水共长天一色”的美景让世人记住了滕王阁。通过数据的视角来理解无人机产品、技术、行业，会让我们的无人机飞向真正的远方。

第四章

不同类型的无人机与控制方式

本章内容涉及无人机的机型结构、控制方式、起飞方式、优劣特点、应用领域等。

4.1 固定翼型无人机



图 4.1 固定翼无人机弹射起飞 (图片来源: 维基百科)

固定翼和扑翼是大自然选择的飞行器结构, 有着得天独厚的优势 (请思考问题: 我们是否见过采用其他飞行方式的生物?)。纵观飞行器发展史, 无论处于哪个阶段, 产生了怎样的创新, 固定翼飞行器都占据着重要地位, 只要有蓝天, 一定少不了固定翼飞行器的英姿。

1. 机身结构

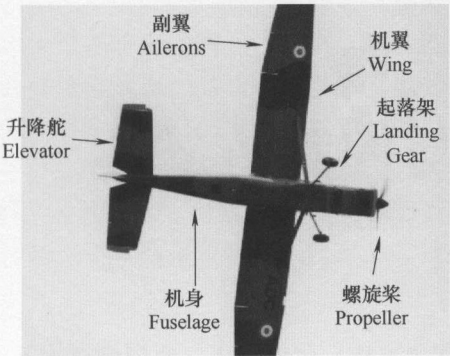


图 4.2 固定翼飞行器中常见位置及中英文名称（图片来源：pixabay）

固定翼类无人机是最早出现的无人机机型。甚至在今天，控制器接收机通道的名称依然沿用了固定翼遥控飞机中常用的叫法：AIL-副翼；ELE-升降舵；THR-油门；RUD-方向舵；GER-起落架等。这些名词并不属于多旋翼或者其他类型的飞行器，却依然沿用，足见固定翼在无人机机型中的重要位置。（请思考问题：为什么其他种类无人机的遥控器沿用固定翼的专有名词却依然可以行得通？）

2. 动力与姿态控制

图 4.3 MQ-9 收割者无人机，前飞动力由尾部螺旋桨旋转产生的推力提供（图片来源：美国空军）



一切飞行器的飞行原理都可以通过动量守恒来理解： $P = mv$ ，只是这个公式在不同飞行器中的实现方式各有差异。

小型、中型固定翼飞行器一般通过机身前部或者后部的螺旋桨旋转，以一定速度向飞行的反方向推送空气来提供固定翼飞行器的前飞动力，同时在高空中借助气流进行姿态调整。固定翼无人机通过在副翼、升降舵、方向舵上安装伺服电动机提供无人机姿态调整必需的横滚、俯仰、偏航力矩。

在结构上，小型固定翼无人机会搭载一个或若干个无刷电动机，连接定距螺旋桨来提供飞行所需的动力；并通过若干伺服舵机控制副翼、升降舵、方向舵以提供姿态力矩。固定翼机型结构是如此简洁明了，以至于从名称上就可以一目了然地看出控制方法了。

3. 起飞方式



图 4.4 美国加利福尼亚州空军基地进行跑道测试的全球鹰（图片来源：美国空军）

对于大型固定翼无人机而言，完全可以采用常规飞机的起飞方式。但中型固定翼无人机由于机身尺寸和载重能力受限，一般不具备搭载大型动力系统的能力，不具备大型无人机的负载与巡航能力，因此需要借助外力起飞。



图 4.5 在伊拉克部署的扫描鹰无人机（图片来源：维基百科）

1896 年，塞缪尔·皮尔庞特·兰利就通过“Aerodrome”奠定了弹射起飞在小型固定翼飞行器起飞中的决定性地位。对于中小型固定翼无人机而言，弹射起飞方式不但省去了与飞行无关的结构，降低了重量，提高了负载能力与续航能力，也同时赋予了固定翼无人机更短的起飞距离，这在很多应用场合，如军事侦察、特定环境的航测应用中是至关重要的。

图 4.5 为美国海军陆战队在伊拉克、阿富汗地区经常使用的“扫描鹰”无人机。弹射起飞方式有利于将更大型的无人机部署到更多地点，如山地、航母等。



图 4.6 渡鸦无人机抛飞与检查（图片来源：维基百科）

手抛起飞一直是小型固定翼飞机的重要起飞方式。大家如果看到一个具备结实右臂、粗壮腰围的飞手，很可能是操作手抛无人机的，与体态清瘦的多旋翼飞手形成鲜明对比。手抛型无人机可以进一步提高固定翼无人机的适用环境，但要求飞手具备一定的操作经验，或者搭配额外驾驶员。（请思考问题：这样的固定翼无人机如何着陆？它的着陆特点与多旋翼无人机相比优势和劣势在哪里？）

传统固定翼无人机的起飞方式就是以上几种。但最近几年，固定翼无人机通过机身结构设计的创新具备了垂直起降能力。



图 4.7 左图展示了 XUV-1 固定翼飞机的垂直起飞方式，右图为该飞行器平飞状态（图片来源：美国空军）

无人机方面，比较有名的例子如谷歌公司的 Project Wing 小型固定翼无人机，与它类似的产品有我国成飞的 VMA、中航的 VD200 等。这类固定翼无人机通过垂直机身和旋翼上的多个定距桨提供上升动力，当垂直起飞达到所需的高度后，再借助机身下部的副翼、襟翼引导气流流向，实现无人机飞行方式的变换，从多旋翼无人机飞行方式过渡到固定翼的飞行模式。

另外一种使固定翼无人机获得 VTOL 能力的设计方法是在固定翼机身上部安装定距螺旋桨负责起降，而飞行过程中依然采用普通固定翼的飞行方式，即通过叠加多旋翼机特有的旋

翼系统或涵道结构到固定翼机身上，构成独立的起飞系统以提供垂直起降能力。

图 4.8 通过在机翼增加涵道结构实现 VTOL 能力的 XV-5A 飞行器模型

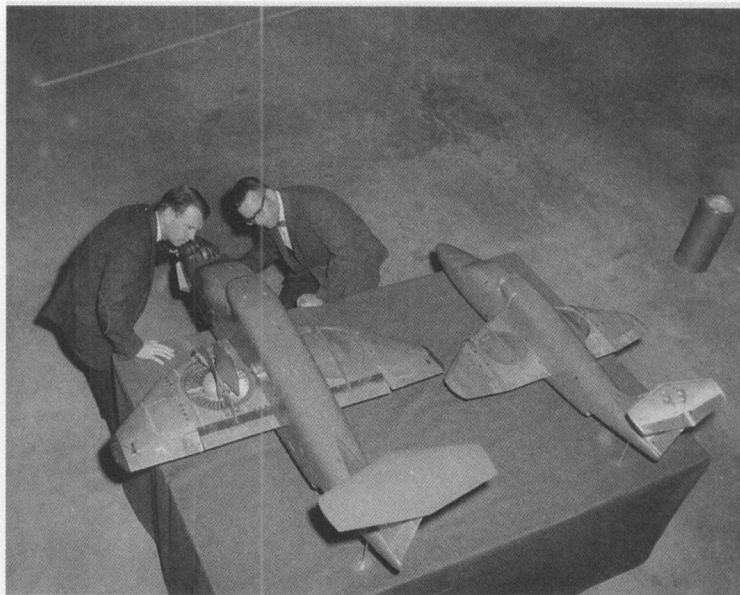


图 4.8 是 XV-5A 实验飞行器，通过双涵道结构提供垂直起降能力。垂直起飞的固定翼无人机既能获取固定翼飞机的气动效率又能具备多旋翼飞机的 VTOL 能力，而且还很酷，为什么尚未大规模应用呢？

传统的手抛型无人机和弹射型无人机都是借助外力起飞，这样的起飞方式使固定翼无人机具备更多的负载空间，只要能够抛得动，弹得飞，到天上去就可以借助气流提供飞行升力。而垂直放置机身的起飞模式虽然使固定翼无人机具备了 VTOL 能力，但由于完全依靠本身的定距桨提供升空动力，就必须增加旋翼尺寸，减小固定翼无人机本身的重量，从而降低了负载能力。而且一个旋翼往往是不够的，一般需要至少两个旋翼（一对正反桨）同时提供动力，但无人机机身尺寸有限，安装部位也受限制，导致彼此距离很近，旋翼间容易产生比较大的气流影响，难以保证垂直飞行或者垂直定点的稳定性。在机身改变飞行模式（垂飞变固定翼巡航）时，需要完成飞行模式的突变，这对控制器的要求是比较高的，系统的鲁棒性未必能够适应任务现场的实际环境。当转变为固定翼飞行模式后，垂直飞行时的动力结构又变得毫无必要，徒然提升了能量损耗和整机重量。

第二种方式可以看作是旋翼与固定翼的直接融合，这样的设计方式同样使得固定翼无人机具备了垂直起飞能力，因为是布局在机身的平面上，空间比较宽裕，可以通过多个小旋翼提供垂直飞行需要的动力，从而增加了旋翼之间的距离，减小了气流扰动带来的影响。同时在飞行模式变化上可以直接切换，无须增添额外的中间过程。但垂直旋翼系统意味着要增加额外的动力元件——发动机或者电动机。而这类元件在小型无人机系统中既需要挤压机身内部安装空间，也必然占用固定翼无人机一部分载重能力。同时当垂飞变为巡航，也就是切换回固定翼模式后，这几个旋翼就将彻底变为累赘了。

4. 不同使用者选择

（传统的）固定翼无人机在没有电源时具备天然的滑翔能力，对驾驶与技术失误的“容忍力”更强，可以在电量较低时携带更重的负载，飞行更远的距离。但对于需要精确悬停的飞行任务而言，固定翼无人机就不合适了，因为它没办法定点悬停，只能围绕着某点进行环绕飞行。因此使用者需要在任务需求的基础上比对固定翼机型的优劣势进行合适的取舍。



图 4.9 航拍带给我们不一样的视角 (图片来源: pixabay)

对于航拍应用,固定翼无人机不适合定点拍摄某一对象。但对于飞行中的城市高空景观拍摄,风景区高空景观拍摄等任务,需要飞行器提供足够长的拍摄时间,足够的拍摄高度(数据量),并能够有效面对复杂的气流环境。对于这类任务,固定翼机型的无人机系统是非常明智的选择。而且在冬天,电池性能往往并不稳定,多旋翼无人机的每个飞行动作都需要系统本身提供动力维持,此时50%的电量提示等于告诉操作者快点返航,而固定翼飞机在空中除去控制系统与伺服舵机外,只需要对一个定距桨提供动力,甚至借助本身具备的滑翔能力,在动力所剩无几的情况下完全可以只通过舵机姿态控制来实现平稳安全的着陆,从而保证了设备的安全和任务的完整实现。

对于地理测绘、电力巡检、农业植保等行业应用,在多年以前就经常采用的小型固定翼载人飞机完成,而固定翼无人机同样具备高空飞行、长时间续航以及强大的有效负载能力。同时固定翼机型容易进行气动设计与机身结构创新,能够根据不同任务提供多种设计方案,而无需将精力分散到类似多旋翼机型的动力环节上。

对于航模爱好者而言,可供选择的固定翼无人机机身多种多样,既可以彰显个性,又可以很容易地进行内部系统设计,相比于其他机型而言,固定翼无人机DIY在组装、飞行、操控等方面都对爱好者非常友好。另一个更加实际的情况是它的价格非常便宜,几十元就可以买到合用的机身,相比于动辄几百元且尺寸十分有限的多旋

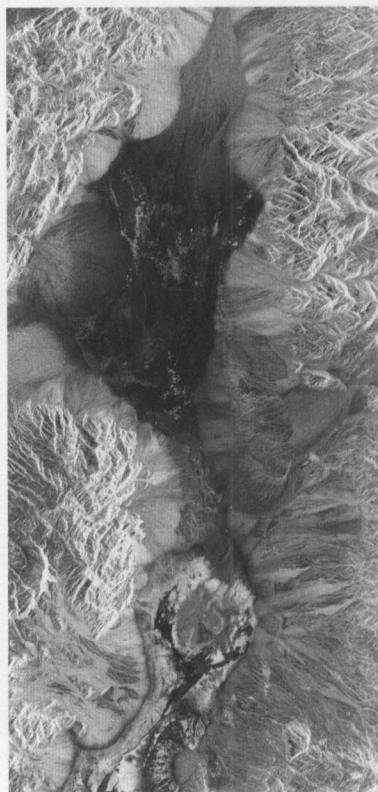


图 4.10 死亡峡谷合成孔径雷达图像 (图片来源: NASA)

翼机身，固定翼无人机可以节约成本，以便爱好者将更多资金花在电动机或飞控系统上，以提高爱机的飞行性能。

对于创业者而言，多旋翼无人机市场过分拥挤，并且在某种程度上限制了应用与创新的高效实现，另辟蹊径不但节约成本，而且可以提供更为丰富的创新机遇。

4.2 直升机型无人机

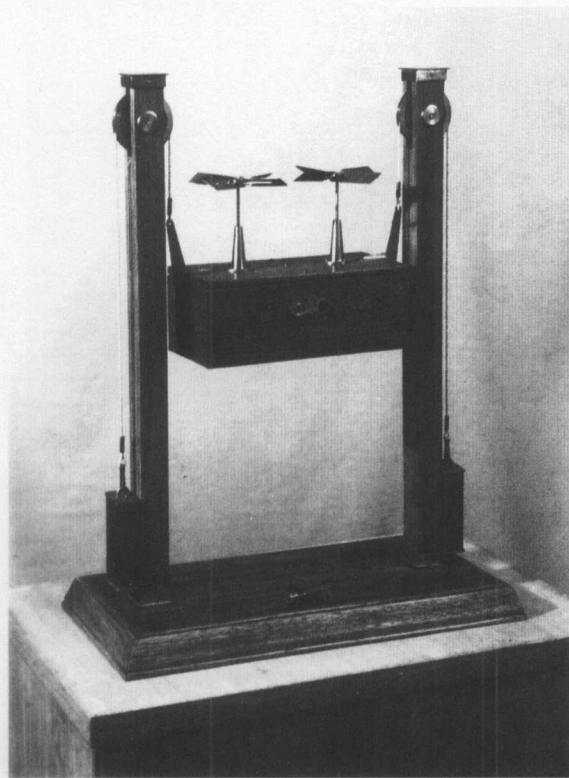


图 4.11 M. Lomonosov 于 1754 年制作的原型机

带来困扰。Autogyro 飞行器会在后面详细介绍。

1. 机身结构

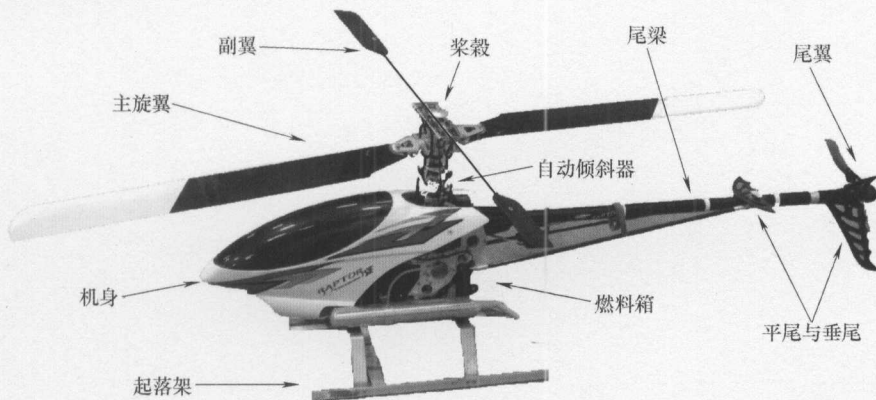


图 4.12 小型直升机型无人机外观及部件名称

由于无人机在很多定义上并不明确，而在不同国家、不同领域甚至不同工程师之间，描述相同事物的名词经常产生区别，这很容易造成误会与曲解。因此本节首先需要说明直升机（Helicopter）和旋翼机（Rotorcraft）之间的“区别”。

维基百科的词条中 Rotorcraft 包含 Helicopter、Cyclogyro/Cyclocopter、Autogyro、Gyrodyne、Rotor Kite，因此可以将直升机看作旋翼机的一个子类，甚至有的时候人们会直接称呼直升机型飞行器为 Rotorcraft，这样的区分方式大多见于外文技术书籍、资料。

而在国内又是另外一番景象，这主要是由词汇翻译与缩略带来的。Rotorcraft 如果翻译成中文是“旋翼机”，然而同样是 Rotorcraft 子类的 Autogyro “自转旋翼机”在国内的爱好者，研发者口中常被省略掉“自转”两个字，也被称为“旋翼机”。虽然同为 Rotorcraft 的子类，但 Autogyro 与 Helicopter 是完全不同的机型，因此很多人把直升机当作了自转旋翼机的子类，这常会给交流沟通

小型直升机型无人机（或称无人直升机）的组成部分包括：主旋翼、尾桨、垂尾、平尾、副翼（在一些设计中，副翼已经被电子增稳系统取代）、主旋翼结构（自动倾斜器和 Bell-Hiller 结构等）、起落架、机身。读者可以比照图 4.16 实际研究项目中使用的直升机型无人机来了解该机型结构。（请思考问题：直升机主旋翼直径大于机身宽度会带来哪些危险？）

需要特别强调的是小型直升机型无人机的气动参数会随着飞行器尺寸的变化而产生差别，在实际的飞行器设计时会使用 Scale Ratio（尺寸比）对气动方程中的参数进行调整。（请思考问题：当尺寸发生变化后会给飞行器带来哪些影响？）

2. 动力与姿态控制

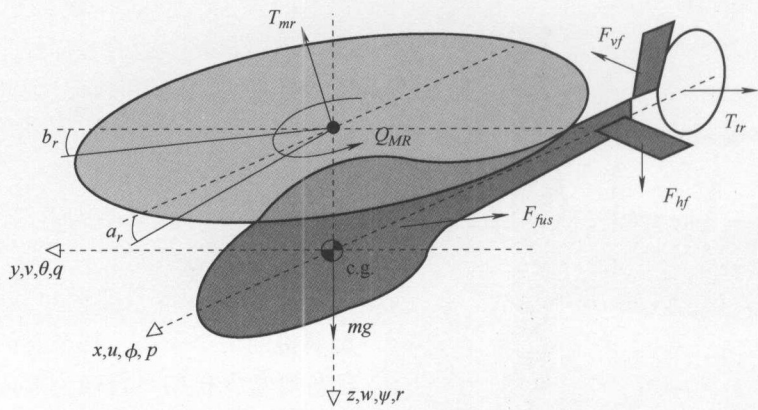


图 4.13 机载坐标与力和力矩（图片来源：参考文献 [1]）

直升机型无人机的运动包括六个自由度：惯性坐标系下三个直线方向，旋转坐标系下三个姿态：俯仰、横滚、偏航（纵向，横向，垂向）。直升机姿态控制力矩来自于主旋翼和尾桨。抛开各姿态中的耦合因素，主旋翼提供俯仰和横滚所需的姿态控制力矩，尾桨提供偏航力矩。直升机型无人机如果将挥舞角也看作内部状态则会增加模型的阶数：位置状态 $[X, Y, Z]$ ，速度状态 $[u, v, w]$ ，姿态角状态 $[\phi, \theta, \psi]$ ，角速度状态 $[p, q, r]$ ，挥舞角状态 $[a, b]$ 。



图 4.14 直升机型无人机主旋翼拉力及尾桨推力示意图（图片来源：维基百科）

容易看出,无人机通过主旋翼旋转提供拉力,但是如何将拉力投影到纵向和横向并产生姿态控制力矩呢?对于直升机型无人机而言是通过主旋翼挥舞实现的。直升机主旋翼桨尖平面(Tip Path Plane: TPP)不是固定在一个二维平面中,而是上下挥舞,以此平衡前飞时直升机主旋翼受力左右不均的情况。挥舞产生横纵挥舞角,主旋翼拉力就是通过横纵挥舞角投影在其他方向上,并通过桨毂产生力矩实现直升机姿态控制。



图 4.15 自动倾斜器。它的结构分为两部分,上面会与主旋翼共同旋转,下边随着伺服电动机的动作而倾斜

直升机型无人机的主旋翼挥舞是通过自动倾斜器改变周期变距实现控制的。图 4.15 为自动倾斜器(十字盘)以及 Bell-Hiller 结构。通过这样的结构将伺服电动机的转动化为倾斜器角度变化,再控制桨距角,最终将主旋翼的升力投影在运动方向上并以此驱动直升机实现六个自由度的运动。

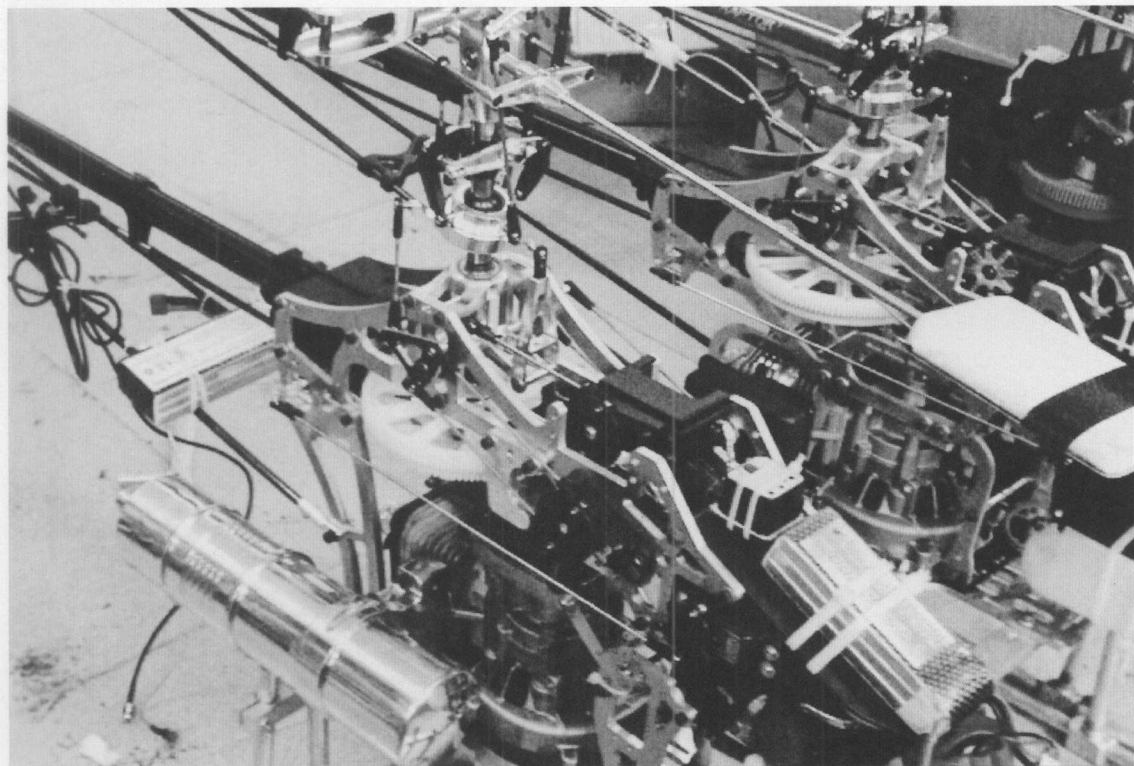


图 4.16 伺服电动机与自动倾斜器连接

直升机型无人机一般通过四个伺服电动机实现姿态控制，一个伺服电动机来控制油门开量。控制姿态的伺服电动机中：Aileron、Elevator、Collective pitch 三个伺服电动机和十字盘连接，控制直升机型无人机主旋翼的总距以及横向、纵向周期变距；Rudder 控制尾桨，一般会连接偏航反馈控制器（Yaw rate feedback controller）对直升机型无人机进行“锁尾”。

小型直升机型无人机的转速一般是恒定的，这是通过恒速器来实现的。常用的如 Futaba GY401、GY701 等，它们本身也是陀螺仪，与接收机连接，通过屏幕设定即可实现主旋翼转速恒定。

3. 无人直升机分类

对于任何一个机型都可以有不同的分类方式，这些方式是人为决定的，并没有绝对意义上的正确与否。在此给出一般情况下直升机型无人机的分类方法，该方法来自技术书籍、工程产品等的总结，可以方便读者根据自己的需求选择或制作、研发相关产品。（请思考问题：在你所关注的应用领域中更看重无人机的哪些属性？如何根据这些属性对无人机进行分类？）

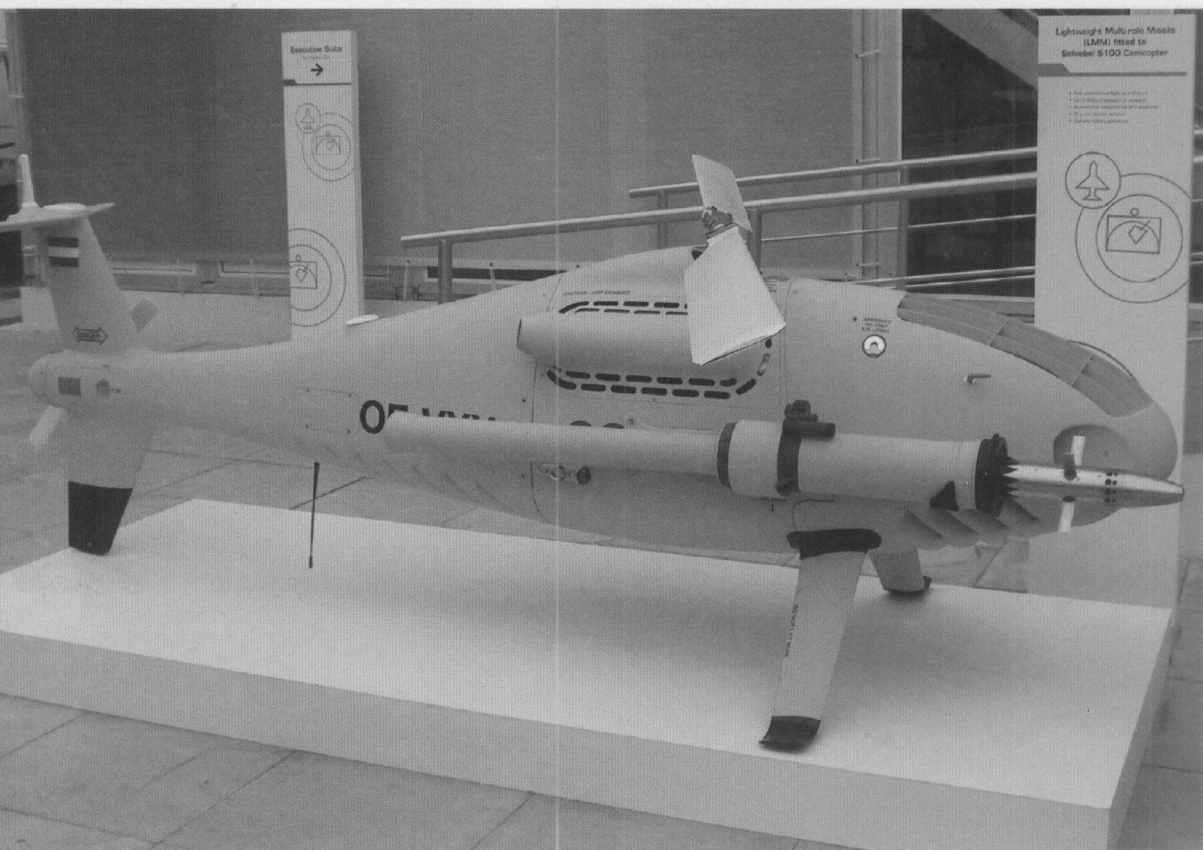


图 4.17 范保罗航展上挂载轻型多用途导弹的 Camcopter S-100 无人机（图片来源：维基百科用户 MilborneOne）

大型：机身长度：2~4m；主旋翼直径：2.5~4m；变距桨数目：2~3，最大起飞负载：20~100kg；机身净重：15~60kg；续航时间：1~6h；动力：柴油或汽油。常见产品如：Schiebel S~100 等。

中型：机身长度：1.2~2m；主旋翼直径：1.3m~1.7m；变距桨数目：2；最大起飞负载：5~20kg；机身净重：3.5~5kg；续航时间：15~40min；动力：硝基燃料或汽油。常见产品如：Raptor 90SE 和 Observer Twin 等。

小型：机身长度：1m 以下；主旋翼直径：1m 以下；变距桨数目：2；最大起飞负载：0.5kg 以下；机身净重：1kg 以下；续航时间：10min 左右；动力：电池。常见产品很多，如图 4.22 中的 TREX-450。

4. 选择

图 4.18 军事行动中的 TREX-450 型微型无人直升机（图片来源：美国军队）



直升机型无人机在各类无人机中具备最优的机动性，同时它在气动效率、负载能力、飞行模式、续航能力等方面也很优秀。因此直升机型无人机对于众多工程项目而言都是最优解决方案。但不可忽视的是，直升机型无人机由于主旋翼翼展与机身宽度比很大，并且转速往往很高，这对于使用者或飞行环境而言都非常危险。

对于专业的航拍应用，直升机型无人机意味着更大的负载能力。很多航拍任务对数据质量要求很高，为了满足这类任务需求，飞行器必须能够携带更加专业的有效负载，对于多旋翼无人机这难免会力不从心。同时多旋翼无人机的设计往往需要在机动性能、机身尺寸、续航时间、负载能力等方面进行大量取舍，当使用者或设计者试图增强其中的某一项能力时，必然会导致其他能力的下降，从而形成此长彼消的不利局面。而直升机型无人机不但具备非常优秀的机动性能，而且在负载、动力单元等方面提供了更加灵活的选择空间，这些都为它的应用提供了有力的支持。

对于工业应用任务而言，无人机需要面对更加复杂、苛刻的飞行环境，以及更加严格的飞行要求。工业应用时直升机型无人机往往要携带大量专业设备，这些设备有时是为了完成工业任务需求，如热成像设备等，有时是为了应对复杂的应用环境，如定位系统的冗余设计等，如果是多旋翼无人机，则必然要增加旋翼数目或者无人机尺寸，这不但会降低续航时间，也会增加坠机风险。想象一下，在林地和低空域海面飞行，下方是高低不平的树木或此起彼伏的波涛，大尺寸多旋翼无人机很容易会触碰到伸出的枝头和翻腾的海浪，但直升机型无人机在相同负重和续航要求下会显得轻便很多。

对于创业者而言，直升机型无人机的机身结构、控制方式等依然是创新的蓝海领域。看到 CES2016 上 Parrot 固定翼无人机创新产品 Disco 大获成功后，能否启发业内的聪明人士研发出一款同样炫酷实用的直升机型无人机呢？

虽然在机型介绍和提问中有所涉及，但作者还是要提醒各位读者重视直升机型无人机面临的安全飞行问题，该机型是现在能够接触到的无人机常用机型中最危险的一种，同时很难向多旋翼那样加装额外的保护结构，无论是启动阶段还是飞行过程中都要求操作人员、协助

人员、参观人员要非常小心，以免带来人身财产损失。

4.3 多旋翼无人机



图 4.19 深圳 DJI 公司悟系列四旋翼无人机（图片来源：pixabay）

多旋翼无人机是现阶段商品级无人机中最常见的类型，可以算是当下的明星机型，也是本书在后续硬件、理论、设计等方面主要进行探讨的对象。然而，最熟悉的，往往也是被误解最多的，用“最熟悉的陌生人”来形容多旋翼无人机非常贴切。

请读者在阅读后面的内容之前，先思考如下问题：

- a. 我们看到的多旋翼无人机都长什么样子？如何对多旋翼无人机进行分类？
- b. 多旋翼无人机有什么特点？
- c. 在我的（或看到的）多旋翼无人机使用过程中能否用其他无人机机型代替？如果可以，为什么？如果不可以，又是为什么？
- d. 机型改动是否会带来控制或操作上的改变？如果会的话，这些改变具体包含哪些内容？

1. 什么是多旋翼

按字面理解，具备超过一个旋翼的飞行器就算多旋翼飞行器，正如图 4.19 中的结构那样。

如果真是这么简单，就好了，可是，看看下面几种机型：



图 4.20 Sikorsky X-2 (图片来源: 维基百科用户 Valder137)

图 4.20 的飞行器, 虽然有超过一个旋翼的结构, 但凭直觉看应该算是直升机。没错, 图 4.20 是 Sikorsky X-2 型复合直升机。还有前文中提到过的 Prime Air, 飞行器结构属于固定翼 + 多旋翼的混合结构。



图 4.21 霍洛曼空军基地中两架降落中的鱼鹰运输机 (图片来源: 美国空军)

大名鼎鼎的鱼鹰“V-22”终于出场了，它具备多于一个的旋翼结构，同时从外观上来看既不像直升机，也不是混合固定翼结构，这样的机型算不算多旋翼呢？

飞行器早期历史中，确实是按照旋翼结构类型进行定义，比如：Fixed Wing、Rotorcraft、Autogyro，我们从英文单词里很容易看出它们与旋翼类型的关系。随着电子控制系统的发展，一种旋翼类型可以有多种姿态控制方式，因此按照“姿态控制方式”或者“飞行控制方式”来进行理解会更加便利地掌握机型特点。

如前面章节中介绍的那样，固定翼飞行器通过机翼产生升力，而它的姿态控制是通过副翼、升降舵等机械结构实现的。

直升机通过主旋翼旋转提供升力，并通过周期变距控制主旋翼挥舞以实现俯仰、横滚两个姿态控制，偏航姿态是通过调节尾桨总距实现控制。



图 4.22 鱼鹰运输机的三种飞行方式（图片来源：维基百科）

V-22 为倾转旋翼式结构，具备三种典型飞行模式：直升机飞行模式、倾转过渡模式、飞机模式。V-22 的两个旋翼并不是采用多旋翼飞行器惯用的定距桨，而是类似直升机主旋翼，具备挥舞铰与变距铰的变距桨。因此整体上来看，V-22 具备多种飞行模式，旋翼结构与直升机相近。

多旋翼无人机是一类通过多个定距桨（螺旋桨）正反旋转与转速控制提供飞行器升力与飞行器姿态调整力矩的飞行器。这样的理解定义方式让我们能够通过多旋翼飞行器的旋翼结构、升力来源、姿态控制与其他飞行器进行区分。

2. 飞行器结构

除去机身与有效负载多旋翼飞行器可以分为三个部分：控制器、执行器、反馈环节。控制器包括飞控、接收机；执行器包括电调、直流电动机、定距正反桨；反馈环节就是传感系统，一般包括两大类：飞行器姿态传感系统和外部环境感知系统。

多旋翼飞行器这三部分的呈现方式比较直观，读者从任何多旋翼飞行器图片中都可以辨别出多旋翼飞行器的对应模块。



图 4.23 正在执行任务的八旋翼无人机（图片来源：维基百科）

3. 姿态控制



图 4.24 四旋翼飞行器通过成对相反方向旋转的旋翼实现姿态控制 (图片来源: pixabay)

四旋翼飞行器正反桨两两成对, 分别向不同方向旋转, 平衡扭矩并向旋翼“下方”推送气流, 通过成对变化定距桨旋转速度, 调整入流量来实现飞行器姿态控制。以 X 型四旋翼前飞动作为例, 当收到遥控器前飞信号或根据任务自动决定前飞时, 控制器会通过摇杆输入或者计算结果增加“后方”(指与前飞方向相反)两个旋翼的转速, 减小“前方”两个旋翼的转速, 从而实现无人机的前飞动作。

一般而言, 四旋翼飞行器有两种飞行模式, 上面介绍的是 X 型控制结构, 也是当下使用较多的控制方式。除此之外还有十字型控制结构, 两者原理大同, 细节小异 (主要体现在具体的力矩计算上)。

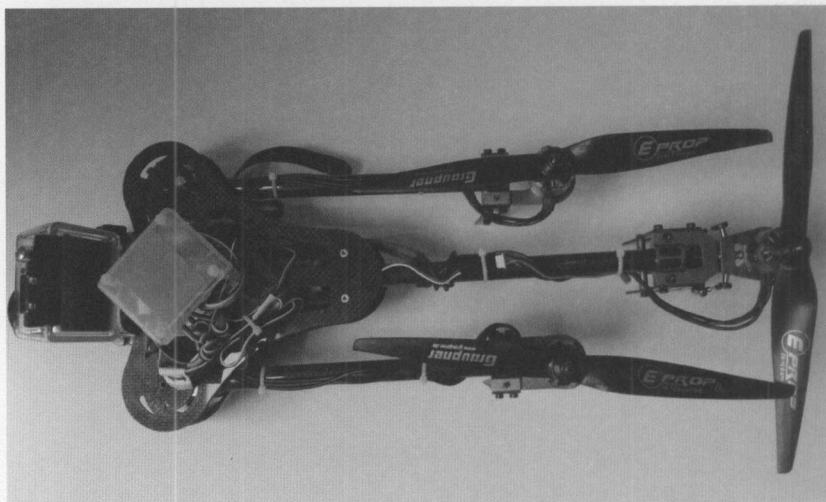
至于八旋翼、十六旋翼等机型, 都是通过成对正反桨等速旋转来平衡扭矩, 提供升力, 调整姿态, 这与四旋翼飞行器如出一辙。下面特别说明两种飞行器控制方式: Y6 和 Tricopter。



图 4.25 MK Y6 飞行器 (图片来源: VilleHoo)

时常有人将 Y6 也看作三旋翼飞行器，它是三角形没错，也许可以被称作“三角飞行器”，但实际上它每个顶点上下各有两个旋翼共有 6 个旋翼，6 个无刷电动机，而三旋翼飞行器这样的称呼很容易给读者造成误解。上下两个旋翼旋转方向相反以平衡扭矩，控制转速以调整姿态。

图 4.26 三旋翼飞行器控制示意图（图片来源：Eirikso）

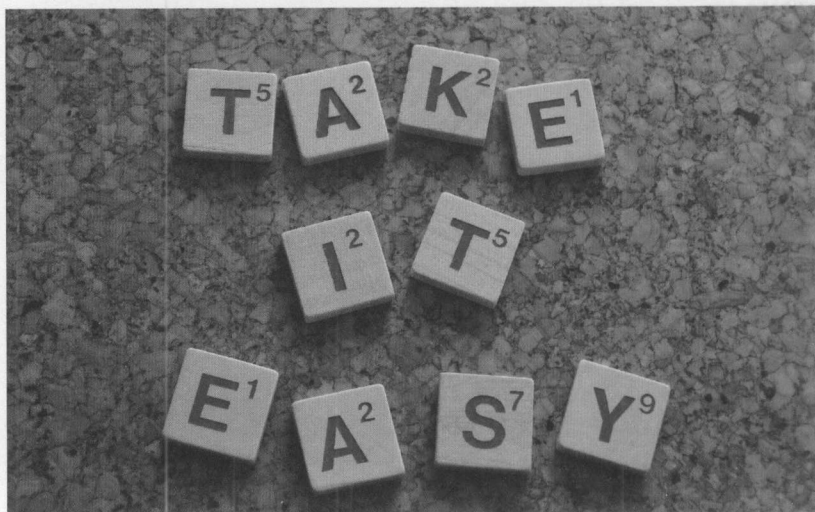


三旋翼飞行器可以称作 Tricopter 或者 Y3，一般会在其中一个旋翼处增加伺服舵机调控飞行器姿态。两种旋翼旋转方式要结合飞控系统的使用手册才能决定。

4. 飞行器特点

多旋翼机型确实降低了商品无人机的门槛。然而在很多飞行器设计师眼中，多旋翼飞行器是一个“奇怪”的存在，它的缺点实在是非常多，但因具有非常鲜明的优点而成为当下无人机市场的宠儿。

图 4.27 操纵消费级多旋翼无人机要放轻松（图片来源：pixabay）



1) 优点

从飞行器操作者的角度来看，多旋翼是完美（简单）的被控对象。

多旋翼飞行器可以很容易地产生统一方向的气流推送，因此具备优秀的 VOTL 能力与定点悬停能力，这是一般固定翼机型望尘莫及的。这使得多旋翼飞行器对起飞环境的要求很低，理论上只要有机身大小的空间就可以起飞了。

同时，对称的旋翼布局使得其操控简单直接，姿态调整时只需成对改变旋翼转速，就可

提供非常“直接”的姿态力矩。而其他旋翼机则一般会有一个复杂的动力学过渡过程，一方面增加了操作难度，另外一方面也提高了飞行事故的出现概率。

而且多旋翼飞行器的姿态变化方式使该机型能够直接采用结构简单的定距桨，相比于直升机的变距桨，在机械设计、控制难度、实现成本、姿态平稳方面都有了很大提升。

用一句话来描述多旋翼飞行器的优点：多旋翼飞行器使飞行变得简单。

2) 缺点

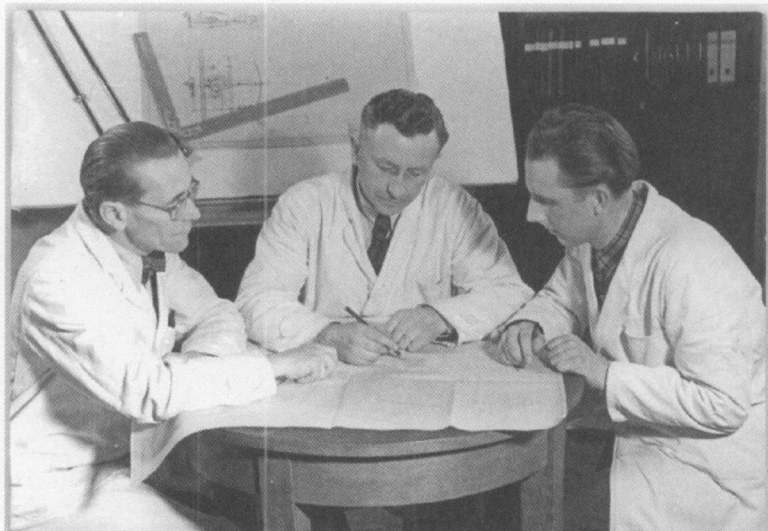


图 4.28 设计原型机的工程师们
(图片来源：德国联邦档案馆)

从飞行器设计者的角度来看，多旋翼飞行器是“丑陋”的。

首先，其气动效率非常糟糕。固定翼是自然界为飞行生物设计的完美结构。固定翼在空中可以借助气流产生升力，姿态变换通过“借力”实现（还是要有执行器控制相应的机械结构，但“省力”很多），螺旋桨或者喷气发动机只提供额外飞行速度。而多旋翼飞行器需要安装与旋翼数相同的电动机来提供升力，在飞行过程中完全没有办法借助空气动力。姿态变化，飞行速度全部来自于机载动力，自身能量消耗巨大，效率之低令人无法恭维。

这也是为什么在讨论翼型时，基本都是关于固定翼和直升机的，多旋翼的定距桨也就是谈一谈扭矩，选择一下旋翼尺寸罢了。



图 4.29 载人直升机特技飞行，
这种机动性的实现是与机械复杂
程度、操作难度、危险性成正比的
(图片来源：维基百科用户
Helder Afonso)

其次，在机动性方面，直升机型飞行器的机动速度与飞行效果往往优于多旋翼飞行器，如果在机动过程中充分考虑直升机机身与主旋翼之间的作用力耦合，并在控制算法中巧妙地加以利用则可以进一步增强直升机的机动性，降低能耗。但对于多旋翼而言，机动过程既不美观也不经济。

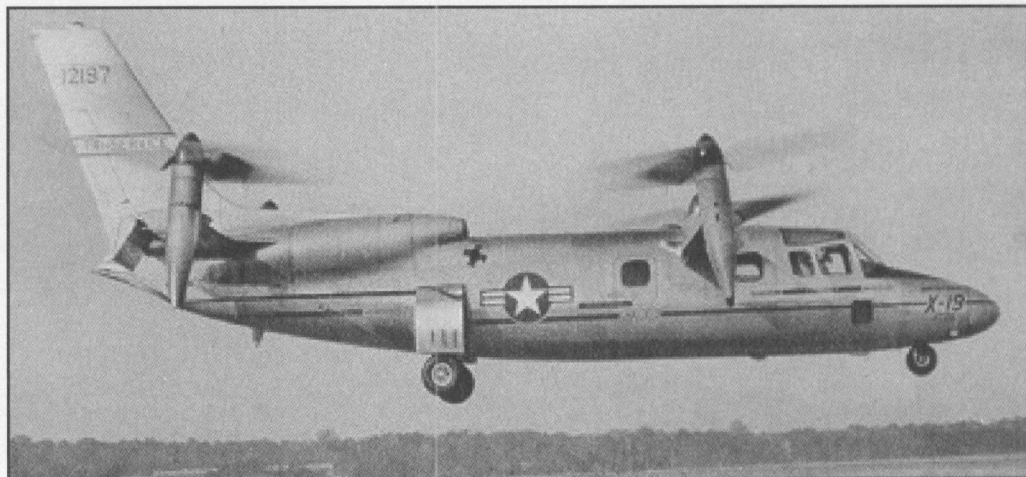


图 4.30 1963 年起飞中的 Curtiss-Wright X-19 实验机（图片来源：维基百科）

最后，当多旋翼飞行器“大型化”后，需要提供额外的升力。这必然导致在设计中选择更大尺寸的定距桨，如此一来，整个设计方案将不得不面临着选择更大动力模块的难题，同时众多大尺寸旋翼在一个平面中旋转又会使实际控制变更加困难，这一切不利的因素耦合成一团乱麻，简直是飞行器设计师的灾难。

用一句话来描述多旋翼飞行器的缺点：多旋翼飞行器使飞行与设计变得没有品质。

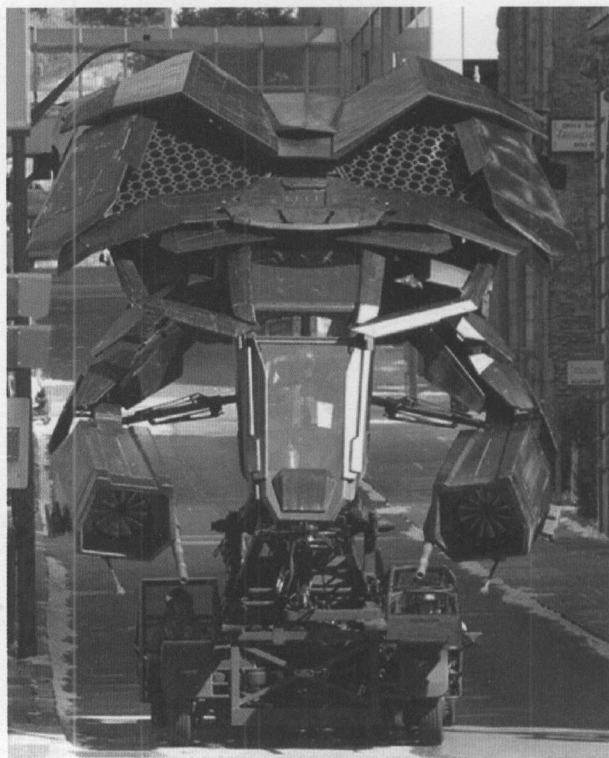


图 4.31 “黑暗骑士崛起”电影中出现的蝙蝠侠飞行器（图片来源：维基百科）

任何一种飞行器结构都存在自己优缺点，换句话说，留给爱好者和设计者的空间是很大的，无人机在飞行器控制方式和结构设计中蕴藏着巨大的创新潜力。相信以后可以看到越来越多的，奇妙、美丽、高效的飞行器结构。创造出属于自己的飞行器结构，难道还不够吸引人么？

4.4 涵道型无人机

涵道无人机（Ducted Fan UAV）正如其英文名一样，对我们而言比较陌生。

提起“涵道”，这两个字大家可能比较熟悉，但对于“涵道”涉及的飞行器及其他概念，大家可能没什么印象。与它相近的词倒是不少，比如“涵道发动机”（涡轮风扇发动机）、“涵道风扇”等，问题来了：这些概念是否是一回事？它们之间的联系是怎样的？

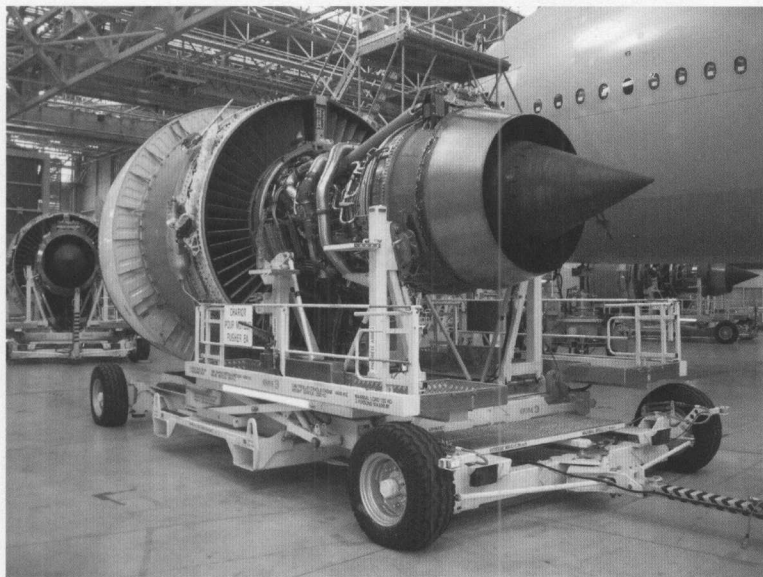


图 4.32 正准备安装在空客 A380 上的 GP 7200 涵道发动机（图片来源：维基百科用户 Michael Pereckas）

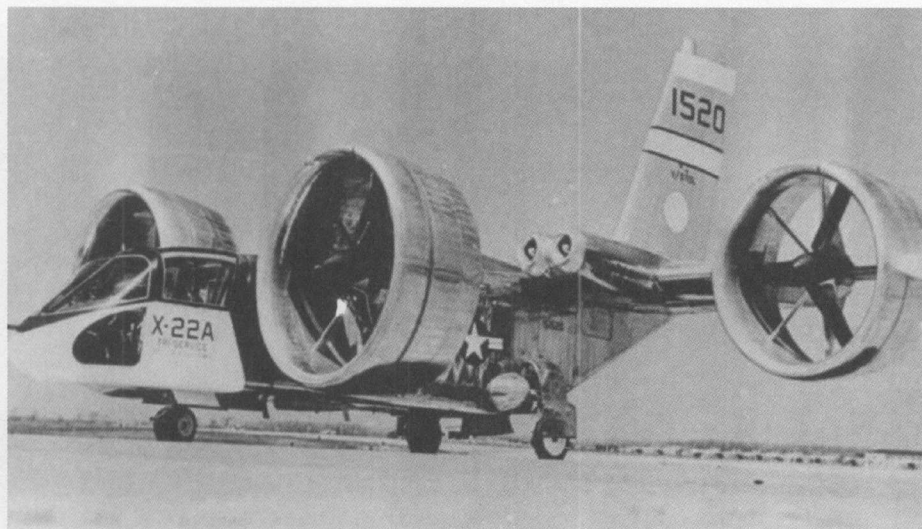


图 4.33 停机坪上的 Bell X-22 飞行器（图片来源：维基百科）

从图 4.32 和图 4.33 的例子来看,“涵道发动机”和“涵道风扇”似乎是有区别的。然而在飞行器设计中两者在很大程度上又是“一样”的:涵道风扇技术的理论与实验研究基本是照搬 20 世纪 50 年代对常规布局飞行器动力装置的涵道发动机进行的研究所得出的结论与数据。简单来说,在涵道无人机的设计上,普遍采用的实验数据和理论都是从涵道发动机中获得的。明明不一样的东西却用相同的理论与数据,这就是现实啊。

1. 飞行器特点

与前面几种机型的介绍过程不同,这里把涵道机型的特点提前介绍,实在是因为它太有“个性”了。相对于固定翼型无人机、直升机型无人机、多旋翼型无人机等,“涵道无人机”更能体现出飞行器概念在表现形式上的灵活性。

图 4.34 为美国 Sikorsky 公司研制的 Cypher-1 型涵道无人机。



图 4.34 Cypher-1 (图片来源:美国海军)

图 4.35 Cypher-2 (图片来源:美国海军)



图 4.35 看上去有着很明显的固定翼飞行器结构特点，但却是由 Sikorsky 公司设计的 Cypher-2 型涵道无人机。

图 4.36 i-STAR 涵道无人机与地面小车构成组合系统（图片来源：美国海军）



从图 4.36 可以看出，由美国 Allied Aerospace 公司研发的 i-STAR 无人机在飞行器结构上与国内曝光率颇高的 Fleye 无人机同属于涵道飞行器，i-STAR 在 2000 年已经试飞成功，表明该类飞行器结构已比较成熟。

以上这些涵道无人机从外形来看似乎区别非常显著，有些机型看上去似乎是两种类型的混合（如：Cypher-2），这不禁让人觉得涵道飞行器的概念太模糊了。但事实上它们都是货真价实的、彻彻底底的涵道飞行器。从外形结构中进行归纳往往会忽视飞行器最核心的特点，我们还是从姿态控制方式上来看一看涵道飞行器具备怎样的特点。（请思考问题：这样的结构设计有什么特点？）

2. 姿态控制方式

一般说到无人机的控制方式只涉及姿态控制方式，但对于一部分机型如直升机型、多旋翼类型等，除了姿态控制外也涉及反扭矩的提供方式。提供反扭矩的方式在上述两种机型中都非常明显了：直升机通过控制尾桨总距提供机体坐标系偏航方向上的反扭矩，多旋翼无人机则通过相同数目不同转向的定距桨实现扭矩平衡。

对于定义范畴非常宽泛而机身结构相对封闭的涵道无人机而言，姿态控制方式和扭矩平衡的实现形式是相当灵活的。

涵道无人机的姿态控制方式可以分为两大类：耦合姿态控制和解耦姿态控制。

1) 耦合姿态控制结构

涵道无人机的常见控制结构：单旋翼结构和共轴双旋翼结构。

其中单旋翼结构常见的机型如 i-STAR，以及“球型”无人机 Fleye。

耦合类涵道无人机一般采用环形结构设计，以 i-STAR 为例，上部中间体中安装动力系统（活塞式发动机、发动机控制器、螺旋桨、有效载荷等）。其中螺旋桨为常见的定距桨，没有变距，没有挥舞，直接由发动机驱动。下部中间体内包含 8 块固定翼板稳定于涵道中央，内部搭载反馈传感器系统。这 8 个固定翼板（固定片）安置角不变，可以平衡单旋翼扭矩。控制翼板（导流片）由伺服电动机控制角度变化，从而产生姿态控制力矩。

共轴双旋翼结构如图 4.37 所示，Cypher-2 型涵道无人机就属于这一类设计结构。共轴双旋翼无人机提供反扭矩的方式显而易见：共轴旋翼等速对转。

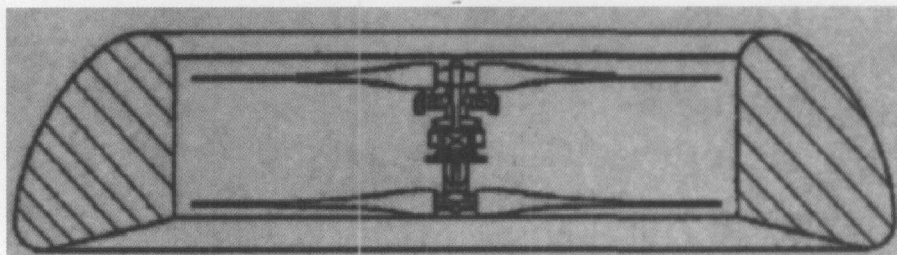


图 4.37 共轴双旋翼结构图 (图片来源见参考文献 [2])

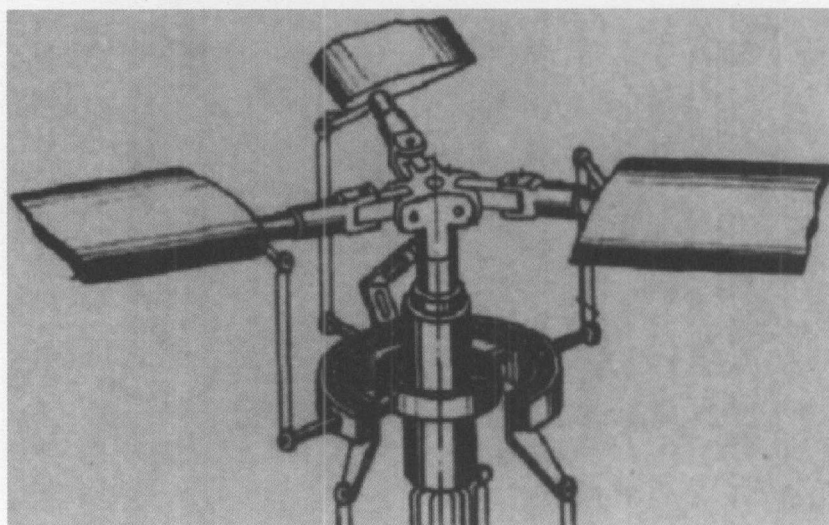


图 4.38 旋转倾斜器结构示意图 (图片来源见参考文献 [2])

该类涵道结构采用旋转倾斜器，通过变距拉杆改变旋翼周期变距从而控制飞行器姿态，类似于直升机的主旋翼结构。

2) 解耦姿态控制



图 4.39 Dragon Stalker 无人机，前飞与垂飞通道解耦 (图片来源：维基百科用户 Firewall)

解耦姿态控制方式非常直接：主涵道提供偏航力矩，调节涵道提供横滚力矩，尾桨涵道提供前飞推力，水平涵道共同提供垂向升力。因此解耦控制可以看作将无人机六个自由度运动分解到单独的涵道中实现，避免相互影响。

3. 涵道型飞行器特点

涵道无人机的研究起始于 20 世纪 80 年代，美国海军陆战队需要空中远程遥控装置实现空中侦察和监视。桑迪亚国家实验室按要求开发出具备 VTOL 能力的首款涵道飞行器，该项目由于受限于当时的飞行控制技术而终止。之后包括 1992 年美国的“多用途安全与监视任务平台”项目；2001 年美国国防高级研究计划局启用的建制无人机计划等。这些例子表明涵道型无人机具备的独特特点与军事需求紧密相连。

1) 安全性

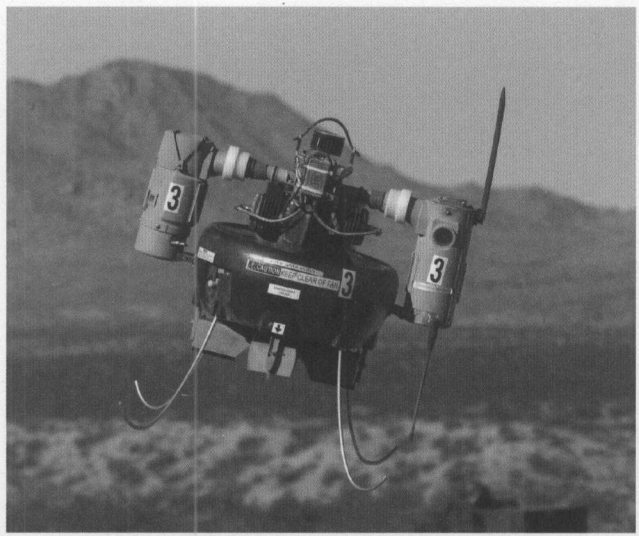
图 4.40 个人涵道式飞行设备
(图片来源：维基百科用户 martin-jetpack)



涵道无人机（不管何种设计方案）旋翼都稳稳地安置在涵道内部。这使得该类型飞行器对于操作者和周围环境都有着无与伦比的安全性。面对环境复杂的林地和人口稠密的城市，涵道无人机都是执行短时任务的首选机型。

2) 机动性

图 4.41 执行军事任务的涵道飞行器
(图片来源：美国军队)



涵道型无人机的机动性特别适合在城市复杂环境下执行任务。与固定翼无人机相比，涵道无人机具备 VTOL 能力，与多旋翼及直升机型无人机相比，涵道无人机可以在非常狭小的环境中进行起降和作业，同时对操作环境和驾驶人员而言，安全性也远远优于前者。同样优良的定点悬停能力使得涵道型无人机具备多旋翼机型特有的图像数据获取能力。

3) 飞行效率

同无人直升机相比，同等功耗下，涵道风扇较同直径孤立旋翼会产生更大拉力：首先在低空速下增加飞行器的推力；其次在所有的飞行倾角下都可以提供气动升力；第三，将飞行器的升力系统和推进系统有效地结合起来；最后涵道壁可以有效地将螺旋桨滑流转换成推力，从而产生附加升力。

4) 隐蔽性



图 4.42 巷战中的涵道无人机（图片来源：美国军队）

这个特点是涵道型飞行器很受军方青睐的重要原因。螺旋桨位于涵道内部，气动噪声被阻挡从而物理性地降低了飞行器噪声的强度和传播距离。借助于动力系统被涵道环扩的机身结构，实现了整体飞行器发动机热辐射扩散性的降低。

涵道型无人机现阶段并未受到市场的太多重视，原因更多在于控制难度、产品成熟度、飞行系统空间设计方面无法满足一些具体任务需求。比如对于航拍或地理测绘而言，涵道无人机搭载有效负载的能力较低，而且数据采集方式受到结构限制，比如摄像头只能放在机身上部，从而限制了数据采集方向。但其设计结构本身具备的安全性，机动性使得该机型非常适用于家庭、室内应用，并且当数据采集对象从风景转化为人体时，比如自拍等领域，涵道无人机又可以发挥出其特有的优势。

涵道无人机是一类特色鲜明的飞行器，从该种机型身上可以看到无人机设计与任务匹配之间的深刻关联。深入理解飞行器特点并设计与之匹配的商业模式一直是无人机产品需要面对的核心问题之一。

4.5 自转旋翼机

自转旋翼机经常被简化为“旋翼机”，然而它和旋翼飞行器并不是同一个概念。

“旋翼飞行器”包含的机型种类非常多，一般将结构上带旋翼的飞行器都纳入这一范畴如：直升机、旋翼机、倾转旋翼机、复合直升机、ABC（Advancing Blade Concept）旋翼式等等。

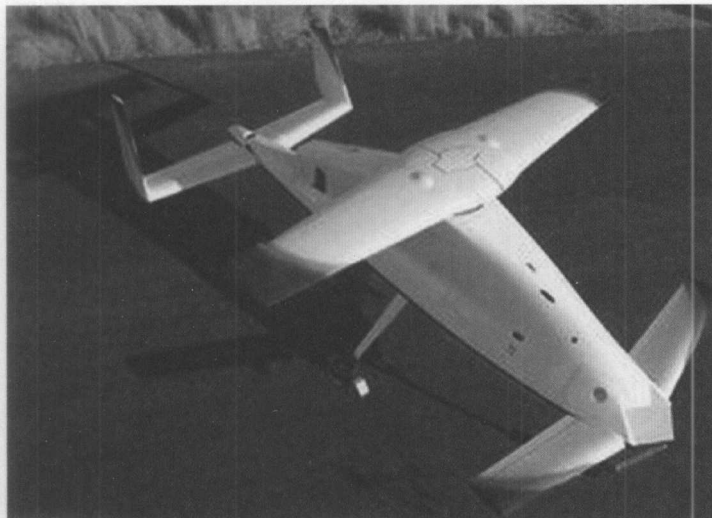


图 4.43 X-50A 高速飞行器（图片来源：US DoD）

如图 4.43X-50A 蜻蜓旋翼/机翼转换式旋翼飞行器，可以从直升机模式完全转换为固定翼模式，该飞机飞行速度接近亚音速。

正如前面在直升机型无人机中介绍的那样，爱好者和从业者最容易陷入的误区是将旋翼机与直升机混同起来。其实从外型来看两者确实非常相像，比如图 4.44 的两幅图，看上去机型是不是很像呢？其实它们是完全不同类型的飞行器。图 4.44 的左图为 Eurocopter EC120B 型直升机，右图是 Europe Calidus D-MTEB 旋翼机，不止是名称不同，两者在姿态控制原理，飞行器结构上都有着本质的区别。



图 4.44 直升机与旋翼机（图片来源：维基百科用户 Ad Meskens）

很多媒体在报道相关事件时也经常会用错名词。比如之前在众多网络媒体中可以看到的标题为“美国邮递员驾直升机闯入华盛顿国会山降落”的新闻中涉及的飞行器就属于旋翼机而非直升机。事实上直升机的驾驶环境与操作难度都是远大于旋翼机的。下面将从两者对比中进行旋翼机飞行与操作的原理解释。

1. 飞行器结构

关于直升机型无人机的结构与姿态控制方式，在前文中已有论述。直升机型飞行器结构

的最明显特征是主旋翼和尾桨（或尾部涵道）。尾桨非常直接地提供飞行器偏航姿态变换力矩。主旋翼机械结构比较复杂，一般会称之为“主旋翼系统”。虽然这两年开始放弃副翼，放弃 Bell-Hiller，转而采用电子增稳，但依然包括变距控制输入（周期变距，总距控制），自动倾斜器结构以及基本传动装置等。直升机主旋翼完全提供飞行器所需升力，并通过 TPP 控制来提供俯仰、横滚两个方向上的姿态力矩，因此主旋翼桨尖速度快，负荷大。

图 4.45 飞行中的 MT-03 自转旋翼机（图片来源：维基百科用户 Huhu Uet）



从图 4.45 看旋翼机结构主要包括①自转旋翼；②推进装置（如螺旋桨 Push/Pull、喷气推力）；③Rudder（尾部方向舵）。与直升机通过主旋翼提供升力与各方向上的飞行动力不同，旋翼机是靠推进装置提供前飞动力，自转旋翼在飞行过程中不与动力部分连接（有些旋翼机采用旋翼预转技术），而是通过相对来流自动旋转，自转旋翼后倾提供升力，通过 Rudder 来控制偏航姿态。

2. 优势与劣势

旋翼机这个机型虽然在无人机中使用较少，但深受民间飞行器爱好者的欢迎。

1) 优势

舒适性

从乘坐舒适性而言，直升机存在许多旋转部件，尤其旋翼转速、负荷都很大，造成机身的颠簸很大，而且机舱内噪声也是震耳欲聋，这对于驾驶员和乘坐者都不是什么心旷神怡的享受。而旋翼机由于机身和动力结构方面的简易性，使得其在飞行过程中更加平稳，噪音也小很多。

飞行速度

旋翼机自转旋翼桨尖速度较小，因此不容易出现前行桨叶激波失速，前飞速度可以有很大提高，而且无须像直升机那样增加平衡反扭矩的尾桨结构。

如美国 Carter 公司在 NASA 项目合作中研发的旋翼机高速型：Cartercopter。最大平飞速度达 640km/h（海平面）~960km/h。



图 4.46 准备起飞的 VPM M-16（图片来源：维基百科）

难易度

图 4.47 Igor Bensen 的 B-8M 自转旋翼机，由滑翔机改装而成，早期产品 B-7M 的模型依然在北卡罗来纳州历史博物馆中展出（图片来源：维基百科）



旋翼机没有复杂的主旋翼铰接结构，自转旋翼结构又非常简单，整机结构也非常简单，操控方式直接，因此对于航空爱好者而言，既容易操作又容易制作。这也正是旋翼机受民间爱好者欢迎的重要原因。

2) 劣势

旋翼机的优势确实非常明显，但正如世间的一切，完美仅仅是理想状态，除此之外皆存瑕疵。

定点悬停能力

旋翼机不具备定点悬停能力。直升机或多旋翼机型具备定点悬停是因为主旋翼提供的升力在垂直方向上完全等于整机重力。而旋翼机的自转旋翼无法提供等同于整机重力的升力，需要借助推动装置提供前飞速度以便获得更多升力。因此一切垂直悬停的场合都与旋翼机无缘。

VTOL 能力



图 4.48 从最初到现在，轮子都是自转旋翼飞行器不可或缺的部分（图片来源：维基百科）

与直升机和多旋翼机型的垂直起降能力相比，旋翼机不具备任何优势。大家可能注意到了，旋翼机底部往往是有些轮子（如果在海上起飞则是气垫）的，这是为了满足旋翼机起降功能必备的部分。

旋翼机一般采用旋翼预转技术，起飞前通过简单的传动装置将旋翼预先驱转，然后通过离合器切断传动链路后起飞。由于旋翼本身不承担整个机身的负载，因此它并不具备定点垂直起降能力。

旋翼机一般采用鹞跃式或超短距起飞。而在其降落时，通过操纵旋翼锥体后倾，需要一块比旋翼直径大一些的地方才可实现点式着陆而非垂直降落，但好在不需要专用机场，这让它可以比较容易地应用在不同作业环境中。

机动性



图 4.49 自转旋翼飞行器的飞行高度并不低，但机动性稍差（图片来源：维基百科）

与其他机型如直升机相比，旋翼机的机动性还是比较弱的。直升机的机动性来自于主旋翼升力在各个方向上分量的快速变化，简单来说就是既够力，又够快。而旋翼机的自转旋翼不与动力连接，无法提供快速机动所需要的旋翼力矩。

旋翼机现阶段主要用于载人机设计。小型无人机飞行线速度一般较低，桨尖速度也很低，不存在大型飞行器中涉及的诸多问题。而小型无人机更看重飞行器的稳定性能、VTOL、悬停能力，因此不具备定点悬停与 VTOL 能力的旋翼机并非当下无人机设计的上佳之选。但随着载人自动飞行器趋势的到来，未来也许会有很多炫酷的自动飞行旋翼机载具出现倒也未可知。

了解无人机

“了解”某事物，其实是一个非常高标准的要求。

城堡在大三时已经不是学院辩论队的队长，当时作为观众来到学校的辩论大赛决赛现场，看着去年培养起来的队伍在场上唇枪舌剑，真有一种恍惚的感觉……最终我所在的电信学院获得亚军，负责活动的老师走过来开玩笑地对我说：“你是不是故意留了一手没教给这届学生，好让你们那次成为咱们院唯一的冠军？”，我已经忘记当时是如何客套了一句，只是清晰地记得心里的那份尴尬。

城堡进入大学前就非常崇拜历史上的雄辩之士，合纵连横的苏秦（或公孙衍）、张仪，舌战群儒的诸葛孔明，凡此种种。气势磅礴的演讲或慷慨激昂的雄辩配合着万众瞩目的历史事件，很轻易地诱发起少年无尽的白日梦和虚荣心。“这才是大丈夫该有的样子”这样的观点使得高中时的城堡在脑海中不断模拟自己在某个重大场合聚光灯下慷慨激昂的情景。哦，当然，最后是得胜的一方。

所以我刚进入大学就参加了学院辩论队的选拔，参选的辩手被分成小组准备辩题，进行现场辩论，由学院的前辈评判筛选。由于我太爱出风头，使得队友在选拔赛中几乎没有发言的机会，当得知仅我一人入选后，一半因为羞愧，一半因为不负责任，又选择了退出。第二年学院辩论队前辈全部退队，马上要进行学校辩论大赛，却没人愿意接手，院辩论队里一个同级的好友叫我过去，问我愿不愿意当队长，虚伪的推辞之后，爽快地接下了别人眼里的烫手山芋。之后的学校比赛就如那位老师所言，竟然代表学院拿到了校辩论赛冠军和最佳辩手，并被朋友推荐进入校辩论队成为负责训练的队长。

虽然整个过程中有一些幼稚，不负责任和虚伪的成分，但总得来说似乎是个励志的故事，甚至当我写下这些文字后，回过头来再看那段经历，如果主角不是我本人的话，也会觉得是个皆大欢喜的桥段。然而可悲的是这段经历只是告诉我，想要了解自己是一个多么困难而漫长的过程。

在别人眼中，我是一个能言善辩的人，辩论场上常听到让人飘飘然的点评：电信学院三辩风度翩翩、气势磅礴、旁征博引……。但当我参与的辩论越多，训练过的辩手越多，就越痛苦，我厌烦手里拿着别人给我的辩题，哪怕我对这些内容根本不关心；我厌烦这种正方反方全靠抽签决定，却没有自我立场的“表演”；我厌烦为这些已被告知对错的立场准备材料，用尽各种分析支持一个从开始就注定狭隘观点；我厌烦这种在奇怪的辩题和奇怪的立场下仅仅为了获胜而进行的“表演”；我厌烦在这场“表演”里要拼尽一切，不为对错，只为输赢；我厌烦明明自己厌烦这些，却依然憧憬着短暂的荣誉和别人的称赞；我厌烦把自己厌恶的价值观传授给新的队员……所以当老师问出那一句话时，我心中真实的回答是：“我没有留一

手，我把那一手扔掉了。”

了解无人机可能没有了解人心那么困难，但这并不意味着读者可以轻松地对这一话题，因为任何事物的难度往往是和它的重要性紧密挂钩的。了解无人机比制作一架无人机，开发一套无人机控制系统更加重要，因此形成对无人机正确的理解也比任何具体的技术都要困难。

读者可能并不同意城堡的观点，请读者抓住这个质疑的机会，先想一想针对城堡的观点和自己不同意的态度能够提出哪些问题。

当读者头脑中有了自己的思考之后，请和城堡一同看看下面几个问题：

- a. 怎样算了解无人机？
- b. 为什么了解无人机很重要？
- c. 了解无人机的难度在哪里？

了解无人机本身并没有统一的标准，对于不同需求的读者侧重点也会发生变化。在上一篇的内容中，通过回顾历史上无人机的发展与演变过程以及不同机型结构、姿态控制方式、飞行器特点等内容已经能够在读者脑海中构建起对于无人机的初步理解。原来在历史上有过那么多大型的无人机系统，原来不止有多旋翼一种无人机机型，而且每种机型都有各自的特点等等。从某种意义上来说，上一篇的内容从历史和机型两个角度对无人机进行了“具象化”，让读者通过实物和实际系统形成直观感受。但正如前文所说，了解某事物是非常复杂的，本篇将会跟读者一起从更加“普适性”的角度来观察无人机系统，如当描述的对象从某种特定时期的具体机型扩展到普遍意义下的无人机系统时应该包含哪些硬件？这些硬件在这样一个普遍的无人机系统中起到了怎样的作用？在这样的无人机系统中如何进行数据传递？无人机系统是否具有共同的特点？如何去研究它们或设计控制器？等等。因此本篇的主要目的是帮助读者从更加普遍的角度建立对无人机的理解。

了解无人机的重要性，是由它的普遍性决定。无论是无人机爱好者还是研发人员，无论是针对无人机系统的研发、设计、制作还是子行业应用，都需要清楚无人机系统在所需应用范畴里的核心价值是什么，系统要求是什么，系统特点、重点难点是什么等等。如果不了解无人机系统在该行业中的核心价值和系统要求就会在耗费大量人力物力后被市场拒绝，如果我们不清楚任务中的无人机系统特点会让我们连正确的初期方案都无法形成，如果我们不清楚该系统的重点难点，就可能抬高研发成本，降低产品价值。但矛盾的地方在于无人机的应用极其广泛，机型结构、硬件架构、控制功能等也必须根据应用任务进行相应调整，这就需要读者能够从普遍性上了解无人机，否则只会事倍功半。

了解无人机的难度由普遍性背后的抽象性和深入性决定。当我们要从普遍意义上研究一类事物的性质、特点、解决方案时需要在一定程度上脱离某个具体系统，这样的抽象性会让问题难度大大增加。若要了解一类系统的共有特点就需要我们能够针对个别系统进行更加深入的分析和掌握，哪些是共性？哪些是特性？共性在这个具体系统上是如何体现的？特性又会对这种无人机系统造成哪些影响？其他系统为什么没有这种特性？这会造成哪些影响？等等。因此抽象性要求我们能够从个体扩大到整体，深入性要求我们能够将整体带入到个体，这样的一个闭环无疑是充满了挑战的。

但乐趣和收获也正是存在于挑战之中。一旦读者形成了对无人机系统的了解，这样的方法可以带入到任何工作和研究领域中，并且能让我们在无人机未来的发展与预判中占尽先机。

第五章

走入无人机系统

这几年无人机硬件在广度与深度两个方面的发展速度都比该领域里工程师的学习速度快，因此无人机工程师现在不会打着哈欠抱怨硬件不够用，更多的时候则是处在相反的忧虑中：哇，我还有那么多硬件没有用过，那么多算法没有实践过，会不会被技术的潮流淹没呢？面对这样的焦虑我们该何去何从？

学习速度被行业赶超是必然的常态。从2012年开始，红外、超声、光流、双目、这些硬件都在不断加入无人机系统中，如果眼光扩展到无人机大系统，与数据类型和应用环境结合，那新硬件就更多了：光学自稳摄像头、图传、DGPS、专用农业喷头、VR设备以及各种各样的APP等。在某些电子设备中，硬件设计工程师需要关注的部分在更新换代上，而无人机由于应用范围广，并且在几乎各个领域都处于相对初级的阶段，因此硬件种类还在不断变化中。在当下无人机领域中，想要把每个硬件都吃透既是不可能的，也是没有必要的，但必须清楚这些硬件在无人机系统中的本质作用，这样无论以后产生何种新硬件，我们都可以把它们安放在无人机系统中合适的位置上。

本章对于无人机硬件系统的介绍，有些部分不局限在多旋翼无人机一类，比如电子硬件部分的介绍，以方便读者在更广泛的无人机系统中建立感知。但会有一些涉及无人机硬件的内容在不同的实现方案中存在明显的不同，比如无人机的旋翼系统、机身结构、动力系统等，我们需要把这一部分内容限制在读者最为熟悉的消费级多旋翼无人机系统中。此处特别进行说明是为了起到提醒的作用，但读者在阅读时可以灵活地对待，既可以将“普遍性”的内容带入具体的工程项目和无人机系统实现中加深理解，也可以将“特殊性”内容抽象到广泛的无人机范畴中去归纳和总结。

请读者在阅读本章内容前思考以下问题：

- a. 在你的经验中如何接触新的电子硬件？学习模式是什么？
- b. 有哪些资源是你在学习或应用电子硬件时经常使用的？
- c. 在你使用某款电子硬件时是否思考过哪些功能是无用的？
- d. 能否列举出自己使用过的电子硬件在整个产品系统中的输入输出以及它们在整个硬件结构中的功能和位置？
- e. （本问题针对从事无人机硬件系统开发工作的读者）整个产品的硬件开发流程包含哪些环节？这些环节对应哪些技术？你的工作处于这些环节中的哪个部分？该工作的核心价值在哪里体现？

5.1 无人机硬件系统结构

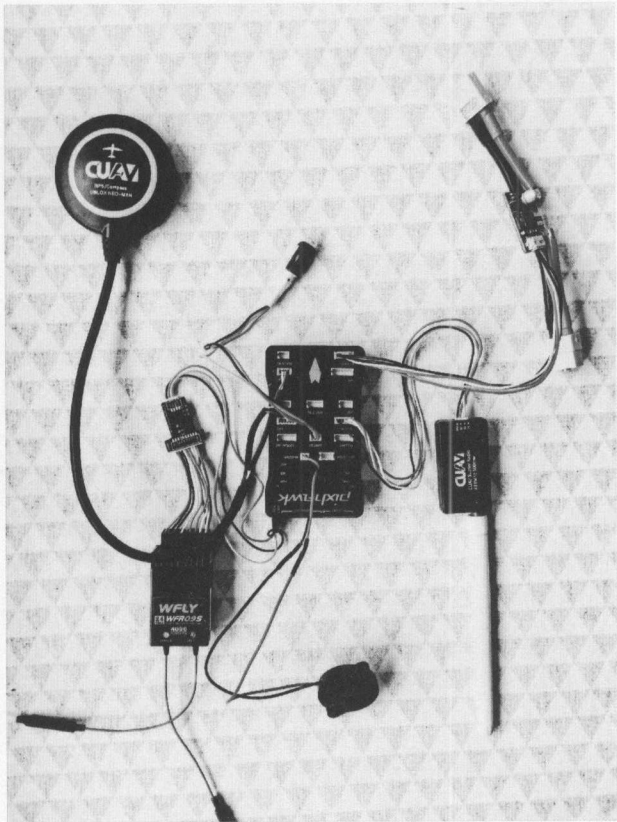


图 5.1 以 Pixhawk 开源飞控为核心的四旋翼飞行器 FCS 连接图

无人机系统所涵盖的硬件数量本已庞大，随着任务要求的不断深入，应用领域的不断扩展，硬件种类还在持续增加。在本书中，将无人机系统硬件细分为六个部分：飞行控制系统、动力系统、被控对象、有效负载、地面系统和能量单元。（请思考问题：你会如何对硬件系统进行分类？为什么进行这样的分类？在你的分类中每个单元之间的输入输出关系是怎样的？）

在本书的讨论中，飞行控制系统（FCS：Flight Control System）包含：控制器模块和反馈模块。控制器模块具体指无人机的控制器芯片，反馈模块则包含种类众多的传感器。我们所说的飞控板有时包含控制器芯片与一部分属于反馈模块的传感器，但在单独的飞控板或电子舱内往往不会包含全部传感器。

不同种类的无人机，动力系统的组成可能会有很大区别，如多旋翼无人机的动力系统一般由电子调速器、无刷电动机、定距桨组成。直升机型无人机的动力系统一般包含伺服电动机、倾斜器、副翼（或电子增稳）、Bell-Hiller 等机械结构。本文主要介绍四旋翼无人机的动力系统组成，有兴趣的读者可以在第三章机型介绍中获取其他机型的动力系统组成知识。

被控对象就是无人机本身。本章探讨的是四旋翼无人机，但必须提醒读者将第三章的内容带入到后面知识的学习中，思考无人机设计与任务匹配的关系：根据任务与实际需求的不同，无人机机型在不同应用中会有各种变化，不同机型的机身结构，材料选择，制作工艺等都会有所有区别。（请读者思考问题：结合前一篇的内容及读者自身的经验，如果在与自己最贴近的应用领域中设计一款无人机，哪一种机型合适？为什么？）

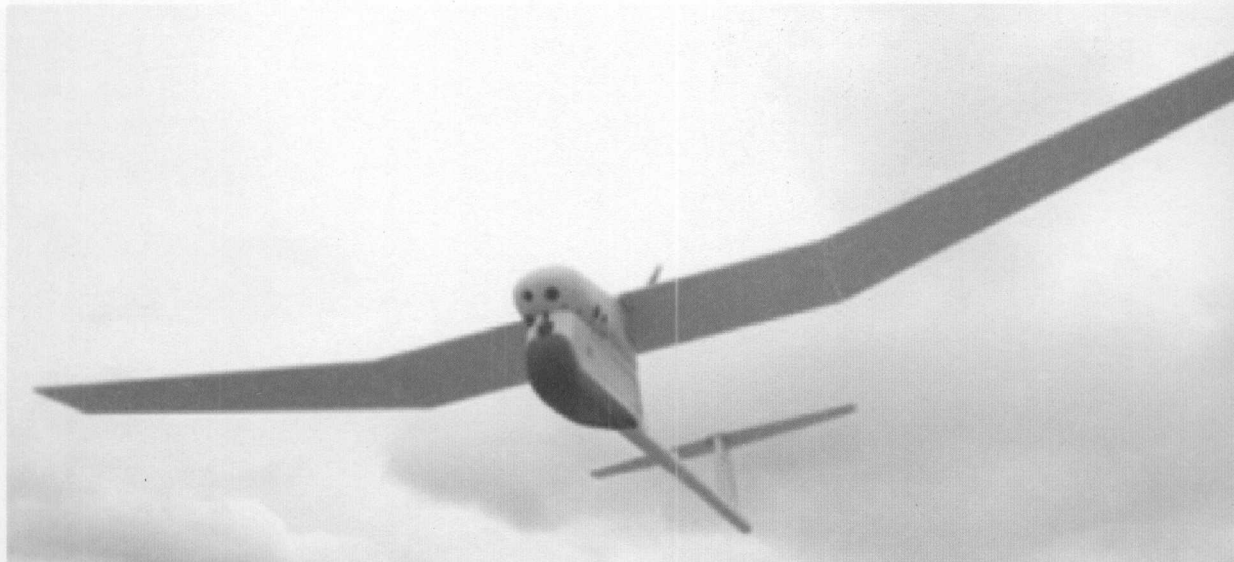


图 5.2 Puma 无人机 (图片来源: US DoD)

有效负载是无人机系统与行业应用联系最紧密的部分。有效负载的硬件组成,设计结构往往会根据无人机行业应用的不同有很大区别。如在农药喷洒应用中须考虑与制剂、农作物和作业现场环境等相匹配的喷灌系统,而在精准农业的应用中也可能搭载近红外相机采集多光谱影像为农业分析提供数据支持,在航拍领域有效负载却可能化身为机械云台和专业相机,在自拍领域则可能变为近距离人像采集的电子防抖摄像头。有效负载对任务实现的重要性是非常直接的,同时它也影响着无人机系统功能、结构设计、机型选择、硬件组成等方方面面。它构成了无人机系统与应用行业的直接纽带,是行业应用类读者需要关注的领域,也是创业者可以重点挖掘的矿藏。(请思考问题:在你关注的应用领域中已经使用了哪些有效负载?为什么?这些有效负载会采集哪些类型的数据?如何对这些数据进行处理?还有哪些数据是有用的但并未被采集?)



图 5.3 通过地面控制站对无人机系统进行起飞前校正 (图片来源: NIST)



图 5.4 RQ-11 渡鸦无人机一体化控制系统
(图片来源：维基百科)

地面系统根据处理数据种类及要求的不同可能只是遥控信号发射器，也可能包含复杂的地面处理软件平台，还有可能是移动端 APP。随着无人机与数据越来越紧密的结合，整个系统中数据的作用正在从单一的信息传递向系统价值核心迁移。在这个过程中，地面控制站系统开始扮演者越来越重要的角色。以往地面控制站仅仅作为控制信号的发射端或者飞控的附加系统，但未来地面系统必然承载越来越多的工作，它们将直接服务于整个系统的核心价值：数据，这将不断增强

它在整个无人机系统中的重要性。(请思考问题：你使用过哪种地面控制站？这些地面控制站有哪些功能？其中哪些对于你的应用最重要？还缺少哪些你需要的功能？)

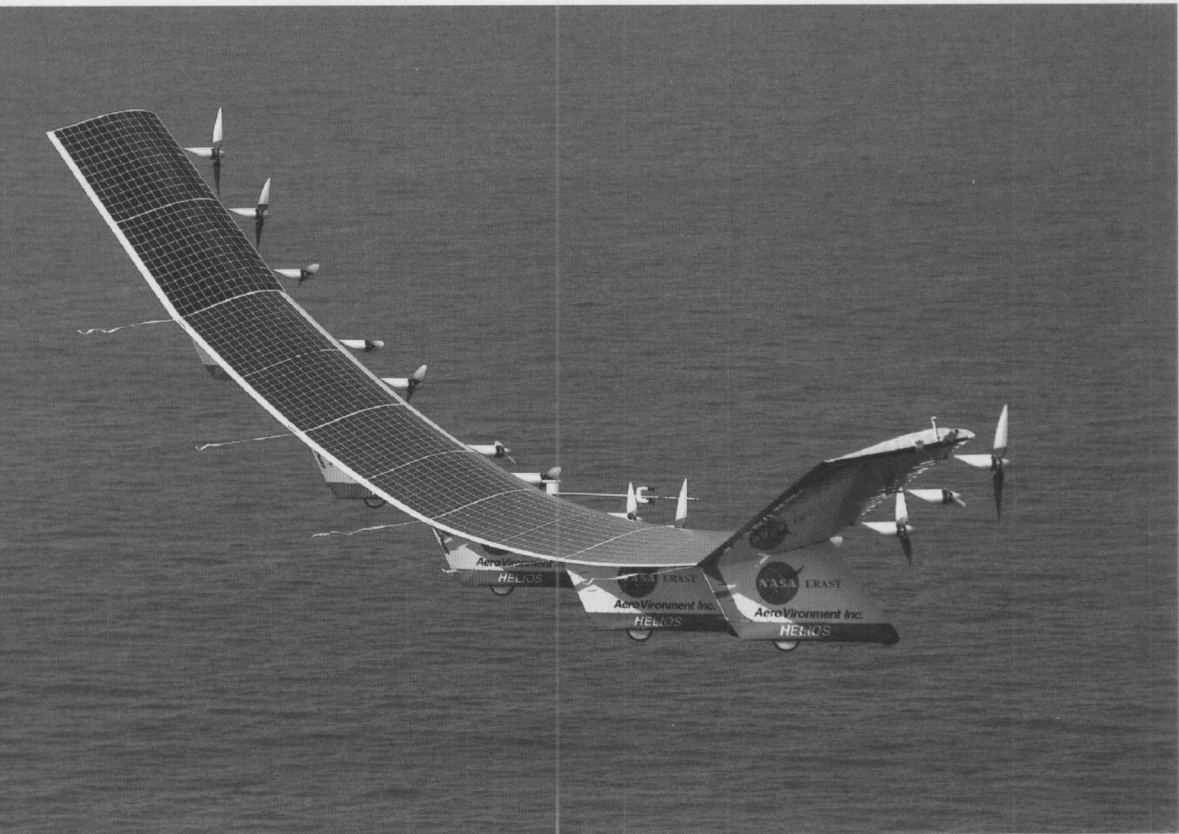


图 5.5 通过太阳能供电的 Helios 无人机 (图片来源：NASA)

能量单元一般指专为无人机本身提供动力的模块。能量单元对任何机器人系统而言都是非常重要的，就好比吃饭喝水对人的重要性一样，它直接限制了无人机系统的有效工作时间。



图 5.6 无人机通过复杂成像技术辨识地表杂草（图片来源：CSIRO）

无人机系统的构成以及其中各个部分的实现方式根据任务要求的不同会产生很大区别，因此囊括所有应用需求的无人机硬件系统是不存在的。城堡在本书中将把硬件系统范围固定在当下个人用户最常使用的多旋翼航拍系统中，同时强烈提醒各位读者，不要被某一类无人机系统知识限制住自己的创造性，而要不断思考：我感兴趣的行业有什么具体要求？这些要求的本质是什么？与这种要求对接的机型如何选择？传感器范围怎么确定？功能如何匹配？知识应该能够引发更多的问题，而问题才能带来思考，只有思考才能带来创新。

5.2 飞行控制系统

对于无人机而言，飞行控制系统是当之无愧的核心，然而它并非一成不变，正如无人机系统在历史长河中的不断演化，飞行控制系统也经历了漫长的演变过程。但本节后面的内容将专门介绍飞行控制系统在我国无人机发展过程中的变化。

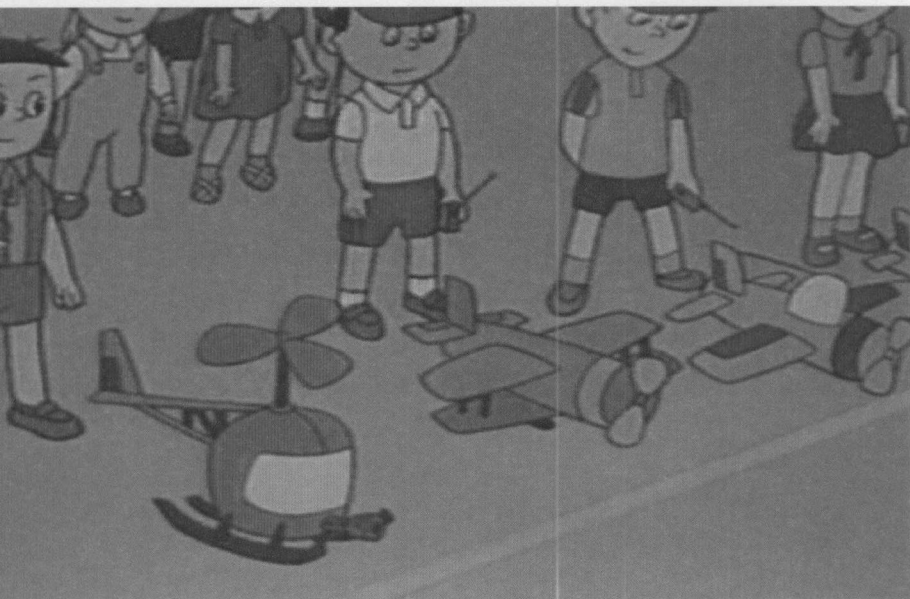


图 5.7 “舒克和贝塔”第四集中航模大赛的场景

21 世纪之前国内很少听到“无人机”这个词，更多的是遥控飞机或者航模。“80 后”的朋友们应该还记得“舒克和贝塔”这部动画片，第四集中两只小老鼠帮助皮皮鲁赢得了航模比赛。那时的航模还没有“控”，因此除了舒克操控的直升机航模外，其他小朋友都使用了相对容易操控的固定翼航模。

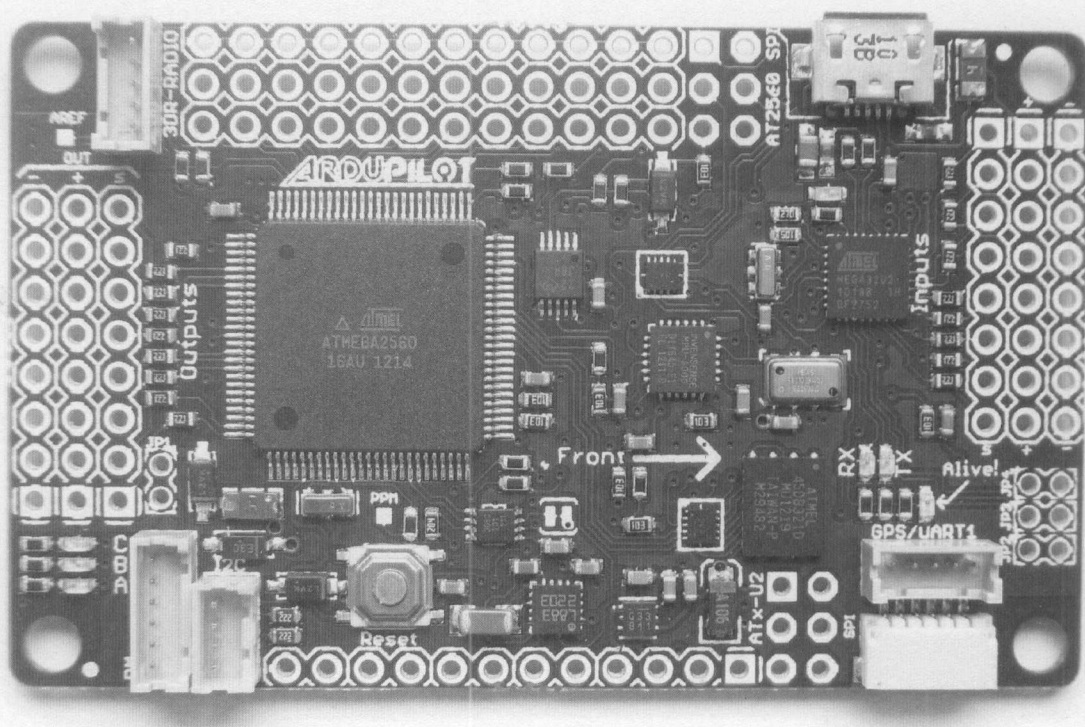


图 5.8 ArduPilot Mega 2.5 开源飞控（图片来源：维基百科用户 Explore Labs）

2000 年以后随着 MEMS 技术的发展以及国内航模发烧友的增加，从航模向无人机的转变趋势日趋明显，很多 FCU（Flight Control Unit）开始出现在人们面前：国内的 KK、QQ、玉兔

等逐渐进入了爱好者自己组装的航模中。伴随着国际贸易的发展,国内爱好者有了更多机会接触到国外 FCU 产品,如法国的 MWC,德国的 MikroKopter、Auto Quad,美国的 APM 系列,穿越机常见的 CC3d、Naze32、F3 等。我们可以将其理解为现代意义上的“飞控板”。这些 FCU 通过相应的控制算法,对无人机系统反馈的状态信息进行解算,根据解算出的状态数据结合算法(一般为线性控制算法如 PID、LQR 等)计算控制量并输出。这个阶段中的 FCU 除控制器芯片外,往往只涉及很小一部分反馈模块中的传感器,同时内部算法一般只针对无人机本身的飞行控制。

2012 年之后,随着航拍等市场需求的挖掘,无人机对自动控制的需求越来越强烈,在系统组成上体现为从 FCU 转向 FCS 的变化趋势。无人机厂家开始生产各自的飞控产品,该类产品更多是应用在该企业无人机产品所面对的市场领域。这类产品与 FCU 在系统范围或元素组成上有着明显的区别,一般不止包括之前飞控板所涵盖的硬件范畴,开始集成更多的传感器模块,如 GPS、光流传感器、视觉定位系统等。

但这种转型并没有彻底完成,由于 FCS 的系统架构,系统设计,相关算法等各个方面都与无人机本身的应用行业息息相关,对于企业而言,真正的难点在于如何实现无人机技术与行业应用的衔接,即 FCS 的产品设计与技术发展不止于无人机,更重要的是延伸到无人机应用的行业中去。

无人机是基于任务的智能机器人系统,整体设计要根据专门的行业应用进行调整。这种调整势必面临来自稳定性、控制精度、行业适应性三个方面的挑战。

1. 稳定性



图 5.9 对无人机进行起飞前检查(图片来源:拓攻科技)

稳定性方面,行业无人机需要面对更加复杂的外部环境:强风干扰、强磁干扰以及特殊情况下的系统稳定性,如大电流情况下的系统稳定性、高温作业环境中的系统稳定性等等。无论哪种情况,FCS 都会首当其冲。如强风干扰下能否在维持快速响应的同时降低超调?高

温下任何一个环节出现问题都有可能导致 FCS 系统部分或全部丧失能力。更多的挑战是在消费应用中往往不会意识到或无须重视的问题，如定位系统稳定性，定位数据精度等。当面对长航时，情况多变，要求提高的行业应用时却可能严重影响无人机任务完成情况，甚至造成重大事故。

面对稳定性问题，从硬件角度出发一般有三类解决方案。最直接的方式是增加备份系统或备份单元（也可称为增加“余度”，但该词多义，谨慎使用）。比如 DJI 精灵 4 包含有两套双目视觉、两个 IMU、两个强磁计，拓攻的 Top-D1，T1-S 等则通过备份 FCU 来降低系统风险。除此之外，Top-D1 采用了差分 GPS（DGPS）系统，支持 GPS L1/L2、BDS B1/B2/B3 双星五频与双星解算，为行业应用提供更精确的定位信息。另外一种方式是增加 FCS 核心元件质量。比如无人机系统最容易出现数据误差与干扰的强磁计，在 FCS 设计时根据行业要求与任务情况进行选择。

上面的两类硬件改进途径一方面可以在很大程度上解决行业 FCS 系统面对的稳定性问题，但另外一个方面也势必会增加系统成本。第三种方法是通过合理的硬件结构与制造工艺达到事半功倍的效果。

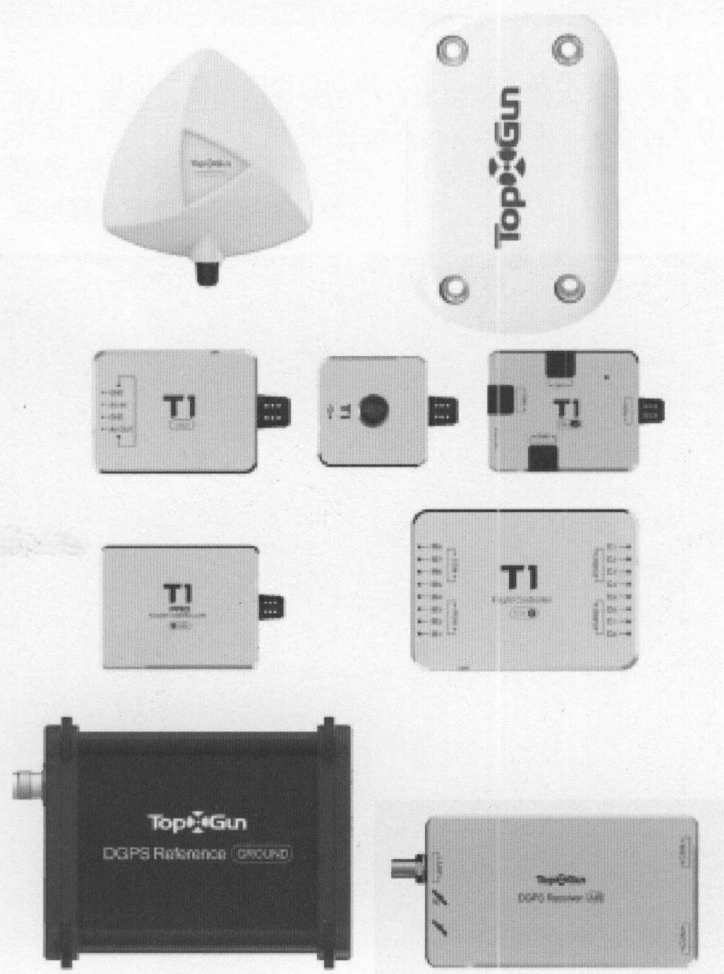


图 5.10 Top-D1 飞控系统（图片来源：拓攻科技）

图 5.10 是拓攻 Top-D1 的硬件图，在每个子模块中采用单独处理器的分布式结构，一方面提高了整个系统以及各子系统的性能，更重要的是保证了 FCS 中最关键部分 FCU 的安全性。从图 5.10 中可以看出，FCS 通过 IMU、OSD、PMU 等模块与 FCU 剥离实现分布式结构，

这样的设计方式，大家也可以在自己的设计中使用。

算法方面，虽然不清楚设计商在行业级 FCS 中是否使用了特殊算法架构，但在行业应用中算法设计不是单独进行的，要配合硬件系统设计以及产品功能实现。

2. 功能适应性

不同的行业对无人机硬件系统的内容、软件功能、算法要求都会不同。比如在植保领域，无人机介入该行业的最基本功能是喷洒农药。面对大面积作业范围，要求无人机能够自动完成相关作业任务，否则在全部人为操作下，这项工作很难保证高效实现，且无法进行量化评价。这要求 FCS 不止针对无人机实现自动控制控制，也要能够将水泵，药液喷灌系统纳入到控制范畴。从设计角度讲，FCS 的设计范畴需要超越无人机。

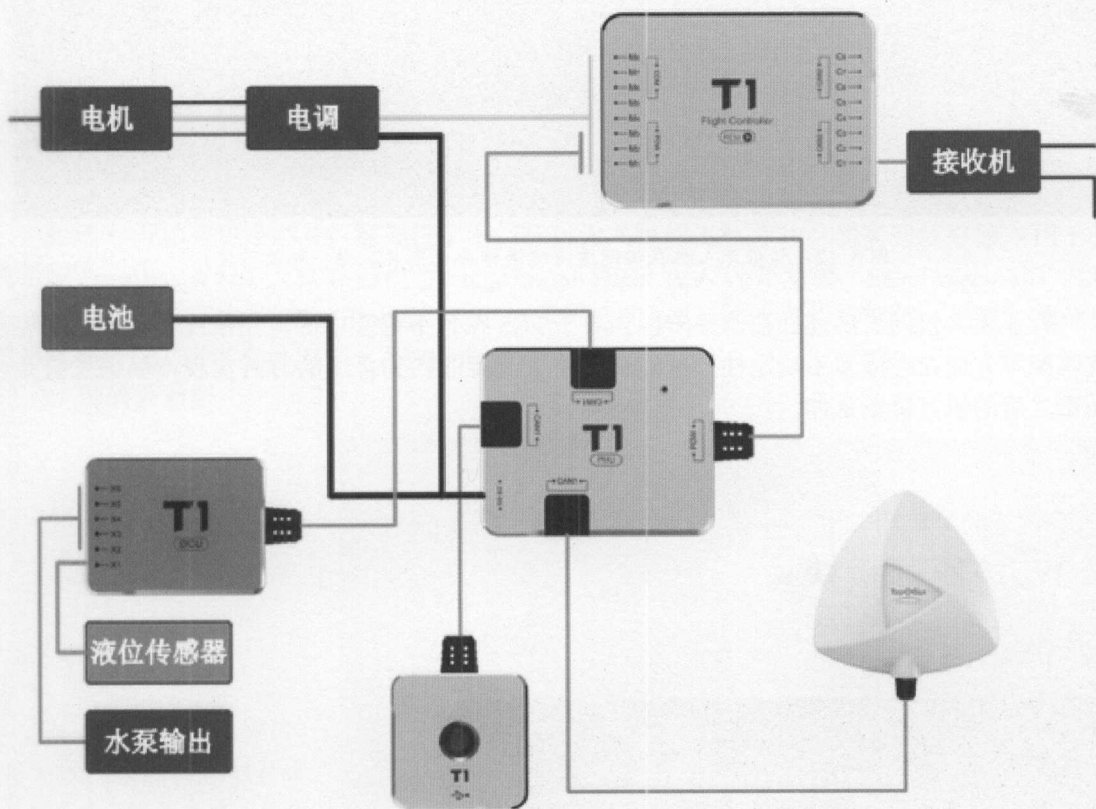


图 5.11 T1-A 接线图 (图片来源: 拓攻科技)

FCS 在面对不同行业时,对于功能适应的实现能力有着非常现实的要求。比如拓攻的植保飞控 T1-A,在硬件结构上专门增添了 DCU 模块处理喷灌过程的数据反馈、动作信号等,同时将液位数据转化为喷灌量,进一步将喷灌量与飞行速度关联,实现喷药量与作业面积的统一,最后将这种数据关联带入到 FCS 对应的“智能作业”功能中。

大家可以从类似 TI-A 这样的行业产品中体会 FCS 是如何一步步通过硬件结构、算法关联、系统要素最终匹配到植保领域的功能需求上来。这个过程中不同的行业理解，不同的设计方式，会产生不同的 FCS 产品。

3. 研发链条延伸



图 5.12 植保无人机在田间进行喷洒作业（图片来源：拓攻科技）

行业无人机的发展还处在萌芽阶段，对于 FCS 在各个行业中的应用情况、需求情况、系统匹配等方面存在诸多不确定性，这要求飞控企业能够找到合适的方式实现产品研发链条在面市之后的研发链条延伸。

5.3 控制器模块

1. 控制器芯片

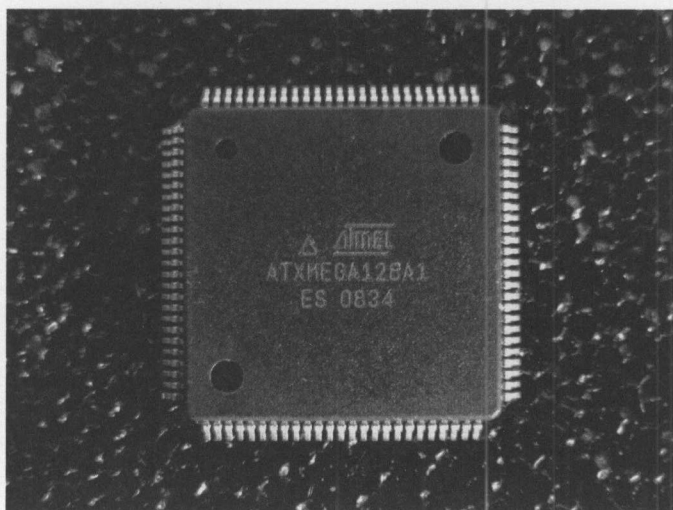


图 5.13 TQFP 封装的芯片（图片来源：维基百科用户 Springob）

在国内飞控系统中经常见到的控制器芯片如采用 8 位 Atmel AVR CPU 的 Atmel Mega2560，基于 32 位 ARM Cortex™-M CPU 的意法半导体 STM32 系列（STM32F0/F1/F2/F3/F4/F7/ L0/L1/L4）等。

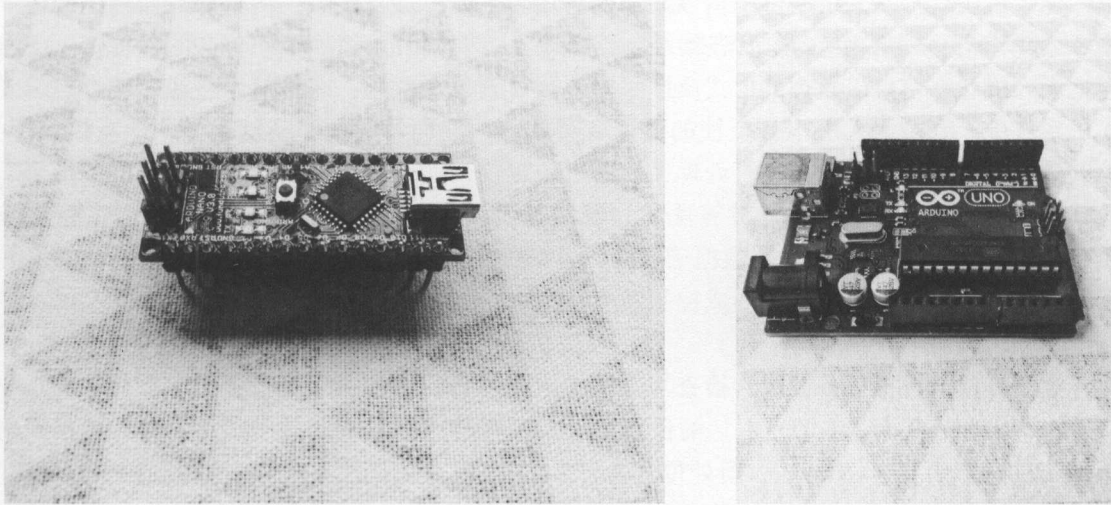
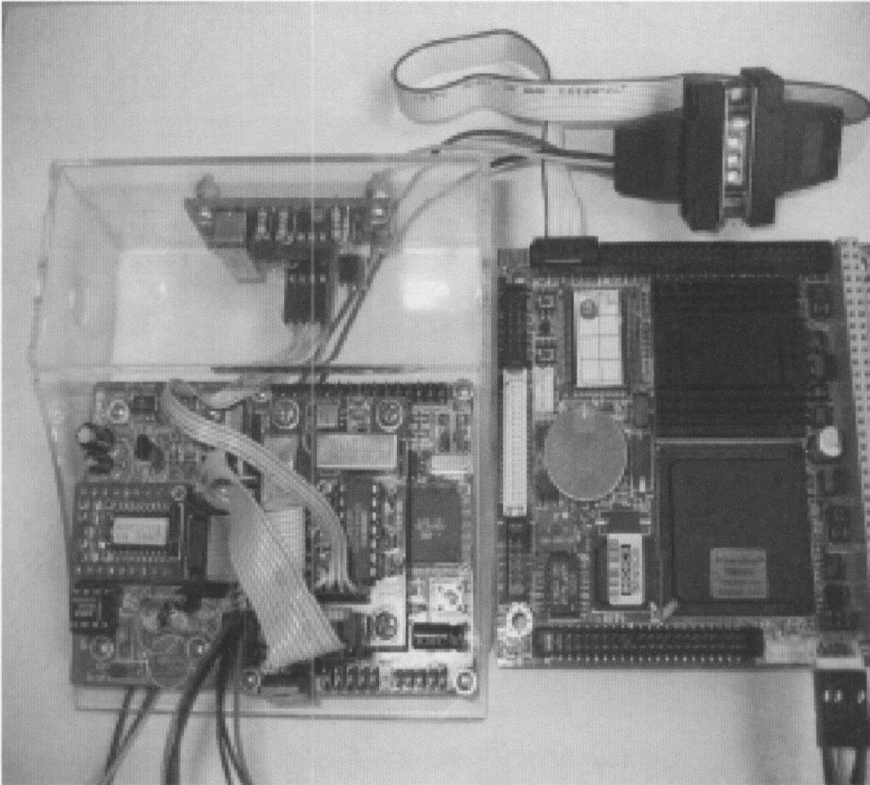


图 5.14 开源控制开发版 Arduino Nano，Arduino UNO，控制芯片都采用了 ATMEGA328P

2015 年开始有更多芯片厂商提供了专门针对无人机的飞控芯片，如高通就以原本用于手机系统 SnapDragon 801 为核心推出了 SnapDragon Flight 无人机开发板。SnapDragon 801 内含 Krait CPU、Adreno 330 GPU、Hexagon DSP 以及可选的 ISP。除此之外英特尔、三星、德州仪器等也都推出了可以直接用于无人机控制模块的相关芯片。

2. 控制器功能

图 5.15 使用 PC104 的导航控制系统（图片来源：参考文献 [3]）



在飞行控制系统中，控制器模块的功能一般包含三部分：飞行与地面数据处理，控制量计算，控制信号输出。

1) 飞行器与地面间的数据处理

无人机飞行控制系统的整个信号流程可简述为：通过信号接收模块获取地面传来的任务指令或操作指令，将相应数据传输给控制器模块，与此同时反馈模块中包含的各种传感器也会把无人机状态信息以数据的形式反馈回控制器（请思考问题：在你使用过或者感兴趣的无人机系统中，针对无人机本身反馈的数据有哪些？）。然而此时的原始信息并不能直接使用，控制器模块需要对这些数据进行处理，如通过陀螺仪、加速度计传输而来的无人机飞行姿态数据，需要在控制器中通过滤波算法“过滤”掉其中的“杂质”并对残缺的信号进行“补偿”（或估计）（请思考问题：数据干扰来源有哪些？为什么需要对某些数据进行估计？），然后通过相应的数据融合算法，形成控制器能够使用的姿态信息。

2) 计算控制量

控制器模块根据任务要求，检查当下的无人机状态。比如某项任务要求无人机以 $u_r(m/s)$ 的速率飞到坐标为 $[X_r, Y_r, Z_r]$ 的位置，这时根据传感器反馈回来的状态信息计算得到当下无人机速率状态为 $u(m/s)$ ，所处位置为 $[X, Y, Z]$ ，因此任务要求和无人机当下的状态并不相同，这就会形成一个状态偏差： e ，控制器模块需要根据“飞行控制算法”向着消除“偏差”的方向给出计算出的控制量来修正无人机状态。

3) 输出控制信号

控制器模块计算出的控制量是根据处理过的姿态和任务目标得到的数值量，必须转化为无人机系统中的实际控制量。无人机的姿态控制是通过无刷电动机驱动定距桨旋转来实现的，因此本质上是电动机调速问题，控制器模块需要根据实际的控制情况输出正确的控制信号使螺旋桨按照期望的转速进行旋转。（请读者思考：控制信号输出一直到驱动螺旋桨旋转都经过了哪些模块？这些模块的输入输出数据分别是什么类型？）



图 5.16 作为在具体农业需求下设计的空中智能机器人系统，植保机的各个部分都与任务实现息息相关（图片来源：拓攻科技）

随着无人机在不同行业中的介入逐渐加深，无人机系统范畴也在逐渐外延，无人机飞控模块要处理的数据种类、数据量都在不断增加。以往无人机飞控模块只需处理与无人机本身姿态控制相关的反馈信息并实现无人机姿态控制目标即可，但在当下及未来的无人机应用中，飞控模块势必根据应用需求处理更多任务数据如图像数据、液位数据等，也会需要控制器模块计算更多部件的控制输出如云台，喷灌系统等。这会在设计、算法、功能等方面对控制模块提出更多要求。

5.4 反馈模块

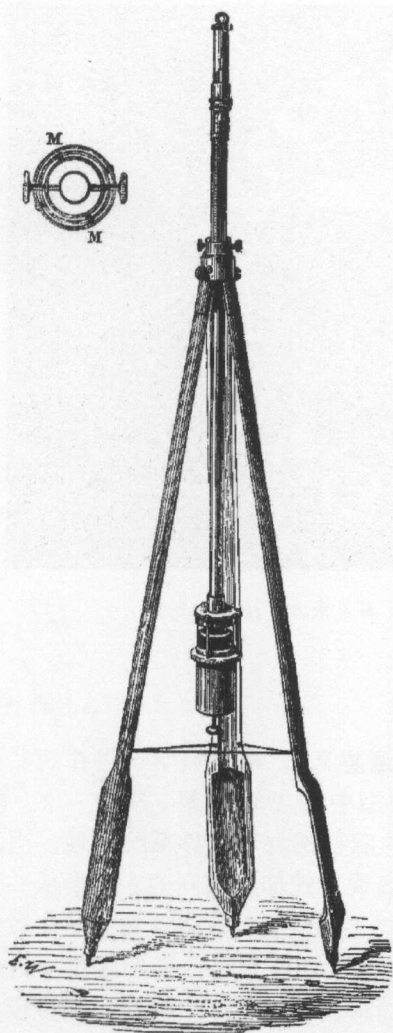


图 5.17 图中描绘了法国科学家在 1883 年制作的气压计，用于预测晴雨。而在无人机领域，气压数据被用来计算高度信息。获取不同种类的信息，并根据任务需求加以分析利用是人类智慧的一大体现（图片来源：维基百科）

反馈模块包含众多传感器，而且随着无人机技术的发展及行业应用需求的挖掘，越来越多的行业硬件会加入到无人机平台中，势必会有更多传感器进入无人机系统的反馈模块集合。因此，一个接一个传感器的学习不利于读者形成全局观，当新的硬件出现后依然会措手不及。需要通过一个“提纲挈领”的视角来审视无人机反馈模块中传感器的共性。

在具体硬件的概述中，城堡会从硬件作用、检测内容、基本原理、局限与处理方法、安装、校准、注意事项等几个方面进行梳理。读者可以根据自己的需求有针对性的阅读，也可

以通过完整阅读来构建自己对无人机反馈模块的“感知”，形成属于自己的深刻体会。

1. 状态视角审视无人机传感器

理解无人机系统最常见的视角是硬件和数学模型。这两个视角各有优势，也各有不足。比如硬件视角能让读者对无人机系统建立直观感受，并通过各个模块输入输出、时序、外围电路设计实践对单个模块形成工程应用。然而硬件视角也很容易让读者忽视了对无人机整个系统的理解，将具体的硬件与无人机系统分割开，最后虽然接触过很多硬件，但对它们与无人机系统间的关系或硬件彼此间的关系理解不清。

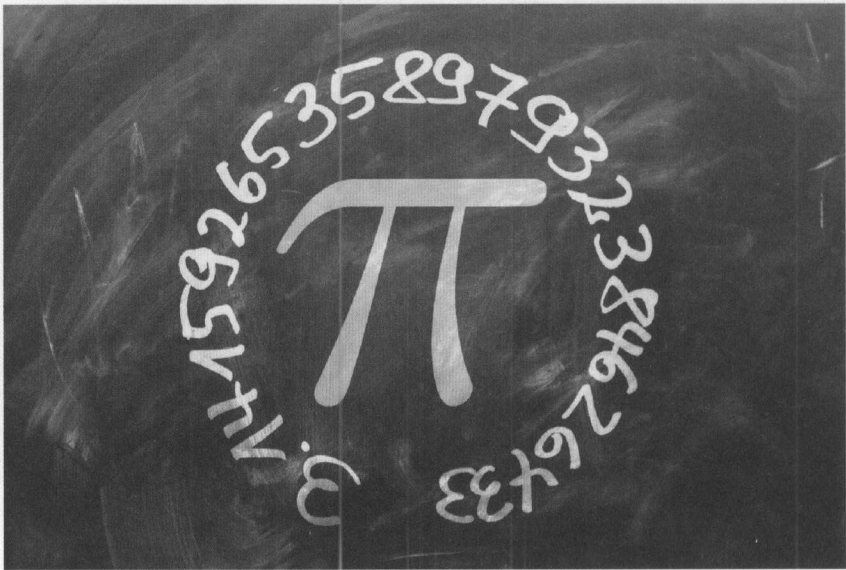


图 5.18 奇妙非常的数学（图片来源：pixabay）

而数学视角则从一开始就着眼于系统的“普遍意义”。单个数学符号在现实系统中可以对应非常广阔的硬件范围，比如闭环误差数学模型中的 X 轴误差 $e_x = X_r - X$ ，既可以通过 GPS 系统实现，也可以通过超声波、光流传感器、双目视觉等硬件系统实现。当出现新的硬件如更加廉价的运动传感系统，在数学模型中的表现形式却是相同的。数学从一开始就在系统“共性”的描述上登峰造极，让研究者可以应对不断发生的硬件变迁。然而数学也有它的弊端。俗话说“成也萧何败也萧何”，数学的抽象性让它在系统共性的表现上具备得天独厚的优势，但也正是这样的抽象性让很多工程师望而却步，以至于“吓走”很多读者。同时只有随着工程实践与研究经验的双重加深才能逐渐掌握其中的奥妙，这是异常费时费力的过程。而在成功建立数学模型与实际系统的连接之前，理论与现实的脱节难以避免。

因此需要选择一个既包含系统高度，又能切实反映硬件功能的“东西”来描述无人机系统的反馈模块。这个“东西”需要能够承载反馈模块的“核心价值”，而本书选择“状态”作为整个反馈环节中最核心的“金钥匙”。从“状态”视角很容易理解反馈模块在系统中的实际意义：反馈模块的意义就是传回相应的“状态信息”，从而为控制器模块提供必要的数据支持。

无人机“状态”数目根据机型的不同会有一定区别。比如相对于四旋翼型无人机，直升

机型无人机会多出两个挥舞角 (Flapping Angle) 状态, 用来描述直升机的挥舞动态。一般而言无人机状态可以分为两部分, 描述“外部位置环”的六个状态, 位置状态: $[X, Y, Z]^T$, 该状态体现了无人机在坐标系中所处的具体位置; 速度状态: $[u, v, w]^T$ 用于描述无人机在机体坐标系下的三个飞行线速度; “内部姿态环”的六个状态即姿态角状态: $[\phi, \theta, \psi]^T$ 分别描述无人机的横滚、俯仰、偏航姿态角; 角速度状态: $[p, q, r]^T$ 描述无人机在机身三个旋转轴上的转动速率。

这里“外环”、“内环”的称呼是无人机控制器设计中的常用控制器结构所演变出来的术语, 同时也是无人机系统多重坐标系的体现。直观来看两组状态分别处于不同的坐标系, 外环状态处于“大地坐标系”, 内环状态则是处于“机体坐标系”, 有关于坐标系的具体内容在本书第五章。

状态反馈的过程就是通过各种无人机硬件实现无人机姿态的“回传”, 因此可以直接通过反馈的状态信息类型对反馈模块中的传感器进行归类。

通过外环状态与内环状态对无人机硬件进行归类: 反馈绝对“位置状态”信息的硬件: GPS (x, y, z)、气压计 (z); 反馈相对“位置状态”信息的硬件: 红外传感器、超声波、单目视觉、双目视觉; 反馈绝对“速度状态”信息的硬件: GPS; 反馈相对“速度状态”信息的硬件对应于相对位置状态反馈硬件。



图 5.19 包含 IMU 元件的电子产品在日常生活中并不少见, 如图中的 DualShock 游戏手柄

无人机内环姿态信息包括六个状态: 三个姿态角和三个角速度。这些状态主要通过 IMU (Inertial Measurement Unit) 中的陀螺仪、加速度计配合强磁计, 结合姿态融合或数据滤波等算法实现反馈。

读者可以通过无人机跟随来感受“状态”视角是如何从硬件与算法上进行功能设计使用的。



图 5.20 大自然是自动控制设计最好的模板（图片来源：pixabay）

当我们自己在跟踪一个对象时，需要知道目标当下的位置信息以及自己现在的位置信息，既不要跟得太紧，也不能被抛得太远，需调整步伐用理想的跟踪速度来保持理想的跟踪距离。

对于无人机而言整个过程也大体类似。无人机需要获取被控对象的“位置信息”以及无人机自身的“位置状态”，计算出两者之间的位置误差，再通过硬件或者算法，计算出应该实现的速度修正量，如与被跟踪对象间的距离差得太远，就要修正无人机速度向着缩小距离误差的方向；类似的，如果与被跟踪对象间的距离太近，也要修正速度速度向着缩小距离误差的方向。这两个例子都需要获得对应的速度修正量，只是修正方向相反。

因此在进行硬件设计时，无论是采用 GPS，还是光流单目，或双目视觉、红外、超声波等，抑或是未来会出现的新的应用场合中能够实现的硬件，它们的作用都是为了传输回无人机对应的外环状态信息。



图 5.21 无人机系统的各种地面设备

同样，无论采用在跟踪目标上携带跟踪系统还是内置传感系统的地面控制站式遥控器或者手机，核心目的都是为了传回被跟踪目标的“外环状态信息”。结合无人机的外环信息，告诉控制模块当下的误差实际值是多少。

如果要实现外环状态的修正还需要内环状态做出相应的调整。此时系统会计算出内环状态目标值,再通过 IMU 等传感器反馈无人机内环姿态信息,送回控制器模块后与目标姿态形成状态误差,并据此以相应算法计算得出控制量,最终实现控制目标。

大家通过状态视角可以实现硬件功能与数学本质的统一,读者可以把这样的思路带入到各种无人机功能实践中去,相信会使整个设计过程变得简单很多。

2. 惯性测量单元

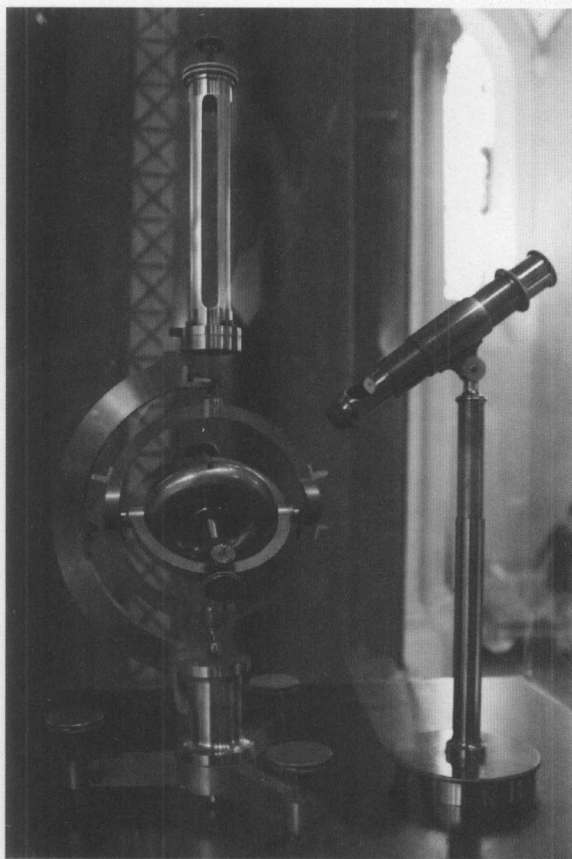


图 5.22 法国物理学家 Léon Foucault 于 1852 年发明的陀螺仪,复制品现收藏于法国国家工艺美术博物馆(图片来源:维基百科)

惯性测量单元 IMU,有时也被称为惯性导航单元 INU 中主要使用的测量元件是三轴陀螺仪与三轴加速度计。陀螺仪是飞行器进入自动驾驶的第一个环节,正是老斯佩里在 1909 设计实现了第一台在飞行器上使用的陀螺仪设备,让无人机姿态反馈变为现实。

陀螺仪的作用是反馈无人机的角速率状态信息 $[p, q, r]^T$ 。随着技术的进步,陀螺仪的制作工艺有了很大的变化,但原理却是一样的。以标准的机械式陀螺仪为例,本身是一个高速旋转的转盘与安装轴相连,旋转中保持转动方向向量不变。一旦发生改变会在安装轴上产生动量。正是通过检测从转盘到安装轴的转动方式来计算转动向量的变化率,也就是角速率了。(请思考问题:陀螺仪的输入输出数据分别是什么?)

加速度计的作用是反馈回无人机三个轴上的加速度信息。原理即通过本身检测到的重力结合在运动过程中不同轴线上的相对压力变化推算出无人机系统在轴线上的加速度。(请思考问题:这样获取加速度数据会造成怎样的误差?)

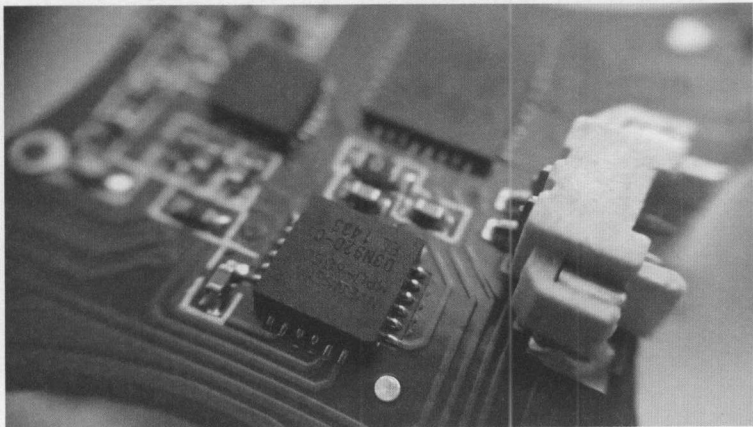


图 5.23 CD-CX10RFW 飞控上的 MPU6050 芯片，该芯片包含一个三轴陀螺仪，一个三轴加速度计以及一个片上 DMP (Digital Motion Processor) 进行数据融合 (图片来源：维基百科用户 Andres Rueda)

然而 IMU 系统反馈的状态信息往往是存在误差的，这就会使控制器模块的计算效果大打折扣。这种误差一般来自于两个方面：算法误差、物理误差。获得无人机姿态信息最直接的算法是角速度积分，而在实际产品中由于积分会导致误差积累，这样直接的暴力计算方式很少被直接使用。更多情况下无人机工程师会采用多传感器进行数据融合，并结合滤波、补偿等相关算法对数据进行处理，保证数据质量在控制器计算能够接受的范围内。

而物理误差则在我们拿到芯片之前可能已经存在，比如加速度计是通过不同方向上的合力来获取状态，如果产生了原始偏差，会导致无人机在水平停放时也提示处于运动状态，这实在是一件很容易使无人机控制器“抓狂”的事情。

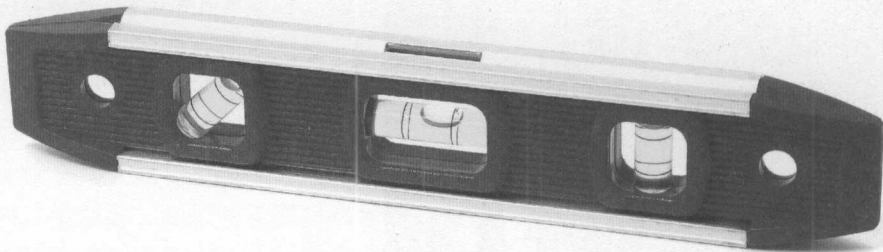


图 5.24 检测无人机是否平放时常用的水平仪

因此在安装时要保证惯性测量元件水平放置，以避免初始误差。可以通过水平仪来检测，也可以通过手机下载水平仪 APP 或者干脆用手机的惯性测量元件校正无人机的对应元件。在无人机起飞之前，飞手需要对系统中的传感器进行校准，以最大限度地避免传感器初始误差，如果不在起飞前排除这些干扰因素，将会给我们的后续分析与操作带来很大风险，起飞前几分钟的硬件校准所带来的效果可能比你在电脑前查一天代码还要大得多。

随着 MEMS 技术的发展，陀螺仪和加速度计在成本、重量、体积、精度方面相比于二十年前已经获得了巨大飞跃。现在工程师可以使用一片价格低廉，封装着陀螺仪与加速度计的小芯片帮助电子产品反馈回所需要的状态信息，这在二十年前是难以想象的。事实上无人机并不是运动感知芯片的第一个受益者，我们在智能手机、视频游戏机，掌上电脑等电子产品中早已体验过它们的性能。对于智能硬件产品而言，信息反馈都是至关重要的环节，而内环姿态无疑是信息反馈中的核心步骤，因此当读者能够在姿态快速变化的无人机系统中熟练实现姿态信息反馈时，恭喜你，这样的技能已经可以满足很多智能硬件的工作要求了。

3. IMU 与 INS

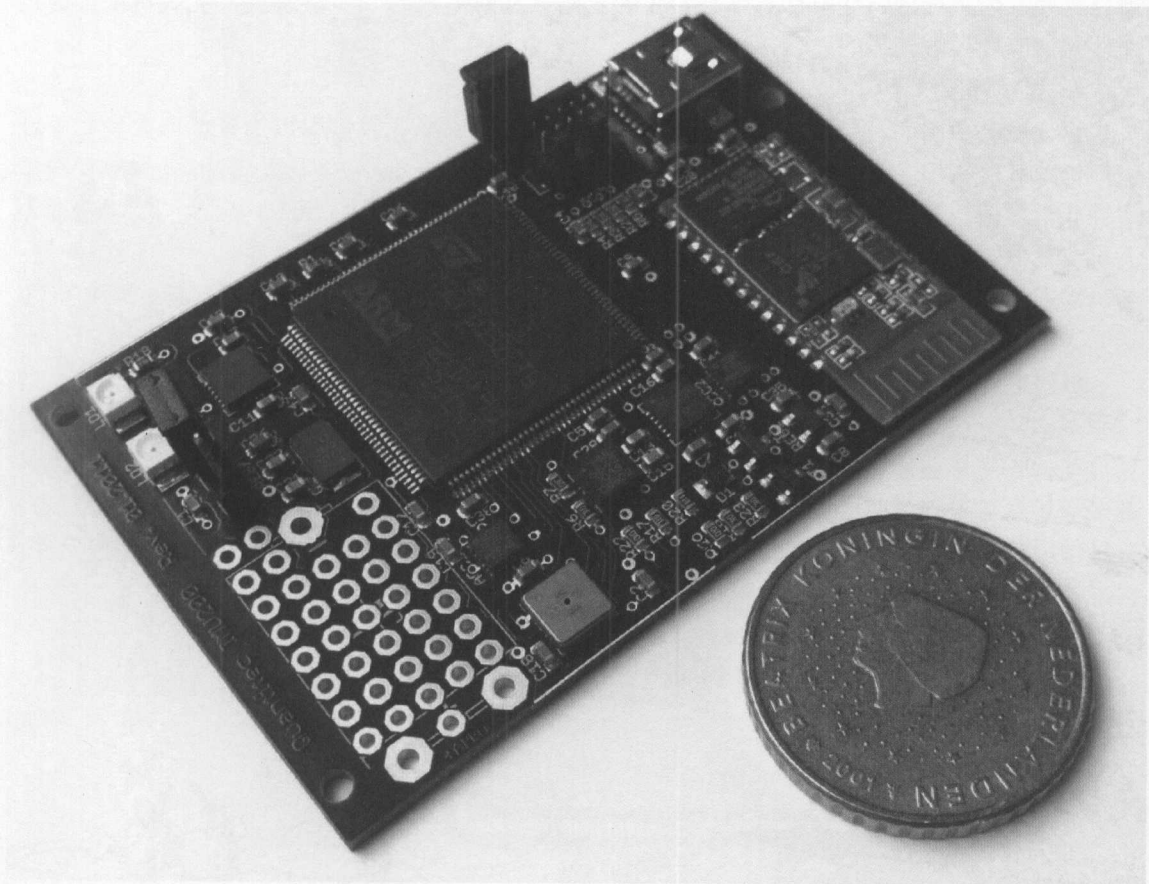


图 5.25 低功耗 IMU 元件 (图片来源: 维基百科用户 Haraldino80)

无人机系统使用 IMU 获取内环状态信息，而 IMU 和 INS 经常被混用。IMU 实现了无人机线性加速度信息和角速度信息的反馈。INS (Inertial Navigation System) 则强调导航计算的功能，负责对信息进行处理，实现位置、速度、姿态角等状态的最终数据反馈。

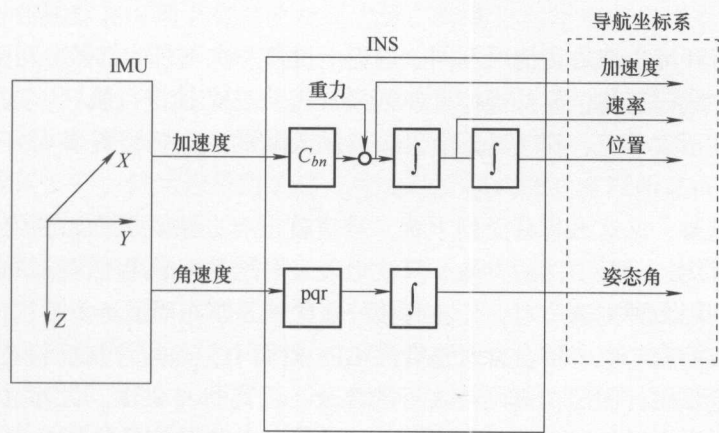


图 5.26 IMU 与 INS (图片来源: 参考文献 [3])

从图 5.26 可以清楚看出两者的关系，IMU 检测相关数据并反馈到无人机计算系统中，而通过这些反馈数据进行导航计算则是 INS 的工作。之前提到的“凯特琳虫”无人机是仅通过惯性元件实现导航飞行的。

4. 强磁计

作为一名中国人，应该对强磁计有种天然的熟悉感，毕竟我们引以为豪的四大发明中就包括指南针这一项。指南针是通过地磁场与系统间的作用来指示方向的，强磁计的原理与指南针非常类似，只不过指南针是被人用来辨别方向，而强磁计则被加入到反馈模块中帮助无人机或其他智能系统辨别“航向”。对于无人机而言，“向哪个方向飞？”是一个关键问题，起码需要知道它与参考方向之间的相对关系，从而让无人机计算出应有的朝向，这时就要用到无人机系统中的电子罗盘：强磁计。（请思考问题：哪些环境、因素会对磁场造成干扰？）

强磁计指明航向的原理非常简单，该模块在使用上也很容易，但却是无人机系统最大的“麻烦”所在，而这些麻烦是由强磁计本身的特点导致的。电子罗盘对于自身磁场和外部磁场环境的强烈依赖使它成了整个无人机反馈模块中最容易受到干扰的传感器。一方面，当外部磁场、变化很强烈时会使得电子罗盘无法辨别地磁场影响，反而被外部的干扰磁场左右。这种情况下就会出现有趣的“马桶效应”，导致无人机一直处于旋转状态，不能定位悬停。二来，“电生磁、磁生电”，电场与磁场之间的相互关系导致强磁计很容易受到其他带电元件的干扰。因此在无人机设计过程中，应尽量保持强磁计远离其他电子元件。

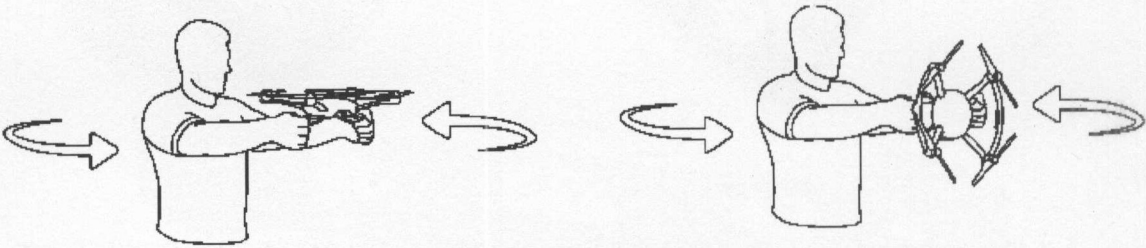


图 5.27 强磁计校正“舞蹈”（图片来源：斯凯智能）

由于不同飞行环境中地磁场情况不同，理论上说每一次飞行前都需要对强磁计进行校正，而强磁计的校正方式很有趣，需要操作者使强磁计围绕三个轴进行旋转，这对于较重的无人机，或布线、安装不太考究，同时又不具备舞蹈天赋的无人机爱好者而言是个令人头痛的问题。

强磁计这么重要，又这么容易受到干扰，难道就没有办法克服么？任何问题总能够在一定的范围内进行解决，只是不同的方案、算法以及硬件会影响实现的范围和效果。对于无人机系统而言可以采用多种方法应对，比较直接一点的就是在布局上远离干扰，惹不起躲得起，对于多旋翼无人机而言，电子罗盘常常整合在 GPS 模块中，远离控制板和电池系统。而直升机型无人机经常把强磁计固定在离尾桨较近的部分，远离机身主体。另外也可以采用多传感器数据融合算法对无人机航向数据进行补偿、滤波，比如通过相应的算法“辨别”干扰并针对该种情况进行“滤波”“估计”等。（请思考问题：有没有可能结合外环姿态或内环姿态来估计飞行方向？）

5. 超声波与红外测距

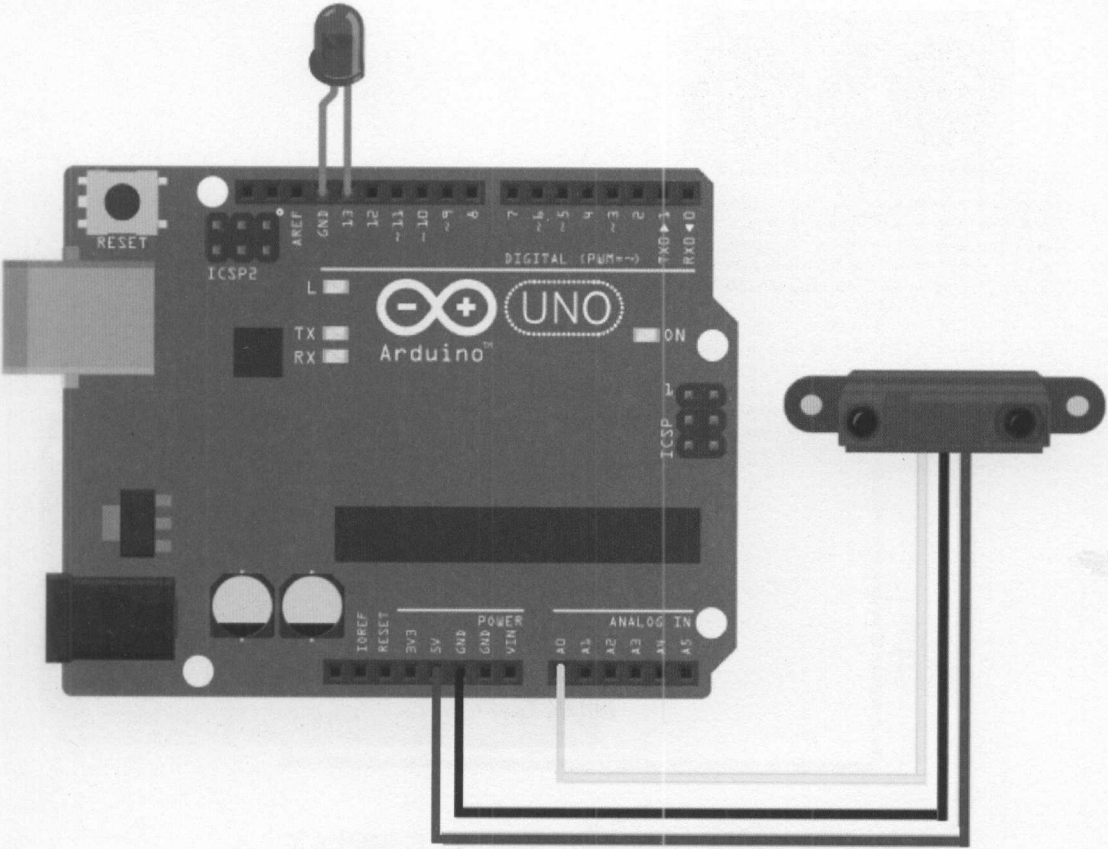


图 5.28 与 Arduino UNO 相连的红外传感器

超声波和红外传感器（IR distance sensor）都属于测距传感器，作用是采用非接触的方式进行距离测量来获取无人机与特定对象（如地面、障碍物等、跟踪目标）之间的相对位置、相对速度。它们的名称虽然不同，实现状态反馈的途径和适用条件也有区别，但对于无人机系统而言，它们的抽象功能却是相同的。（请思考问题：超声波和红外传感器发出的波有什么区别？它们的特点是什么？如何利用这些特点？这些特点可能会带来哪些麻烦？）

超声波和红外传感器在原理上有彼此相通之处，即通过向指定方向发射，并接收特定对象返回的不同类型的“波”（前者为超声波，后者为一定波长的电磁波），并根据该种波的特性及反馈时间来计算无人机与特定对象之间的距离或无人机本身的运动速度。在不同的无人机应用领域，超声波与红外传感器常被用来进行辅助定高或壁障飞行（请思考问题：无人机GPS不提供高度数据么？），但无论是用于哪一种途径，都只能在有限距离内进行，否则就会由于散射、吸收导致测距精度降低。

通过超声波或红外传感器来进行辅助定高时，对地面环境的要求比较高，换言之，如果地面环境比较复杂，就会给超声波或红外测距带来很多干扰。以超声波定高为例，超声波为了获得足够的反馈信号需要离障碍物比较近，但当地势变化不均匀或植被高低不平时就会给无人机定高带来很大干扰，使无人机无法稳定保持与特定对象的高度，换句话说讲，相对高度误差会在特定干扰或环境中超出允许的最大“边界”。

因此在无人机系统上使用超声波、红外等相对距离传感器时，虽然不需要担心加速度计等传感器的校正问题，但是却不得不面对更多来自环境的干扰因素。

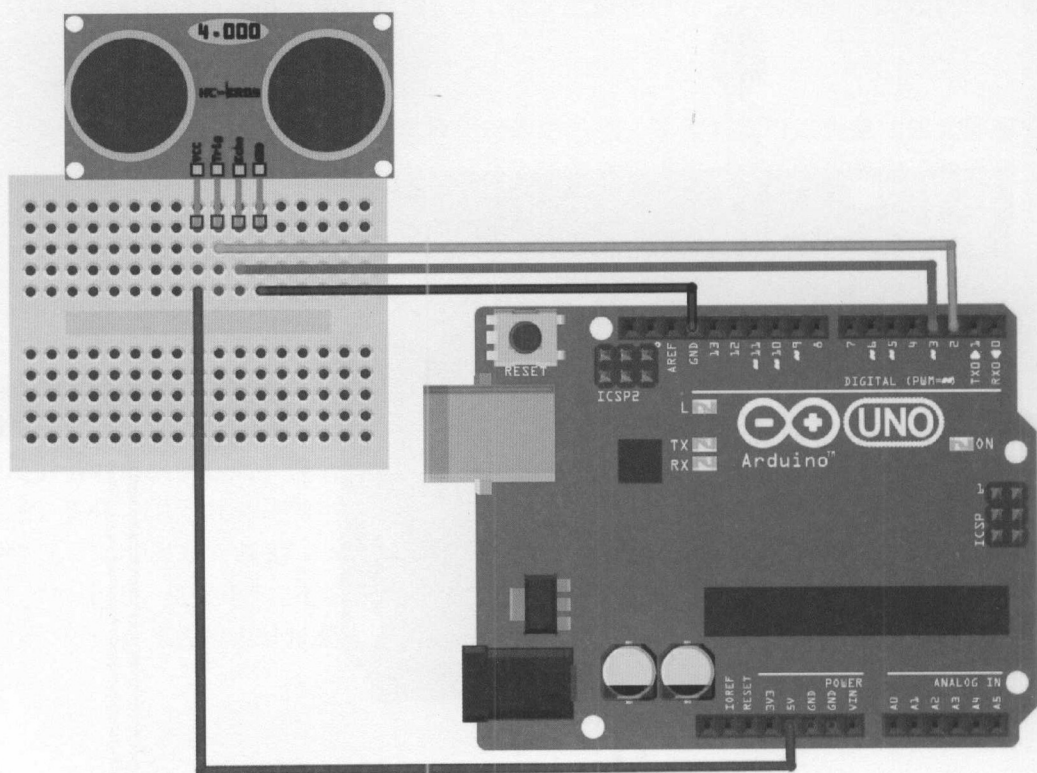


图 5.29 与 Arduino UNO 相连的超声波测距传感器



图 5.30 复杂的地面环境及其变化都会影响无人机的正常飞行，工程师必须时刻牢记无人机是在真实环境中进行运动的，这与虚拟环境有着质的区别

6. GNSS 系统

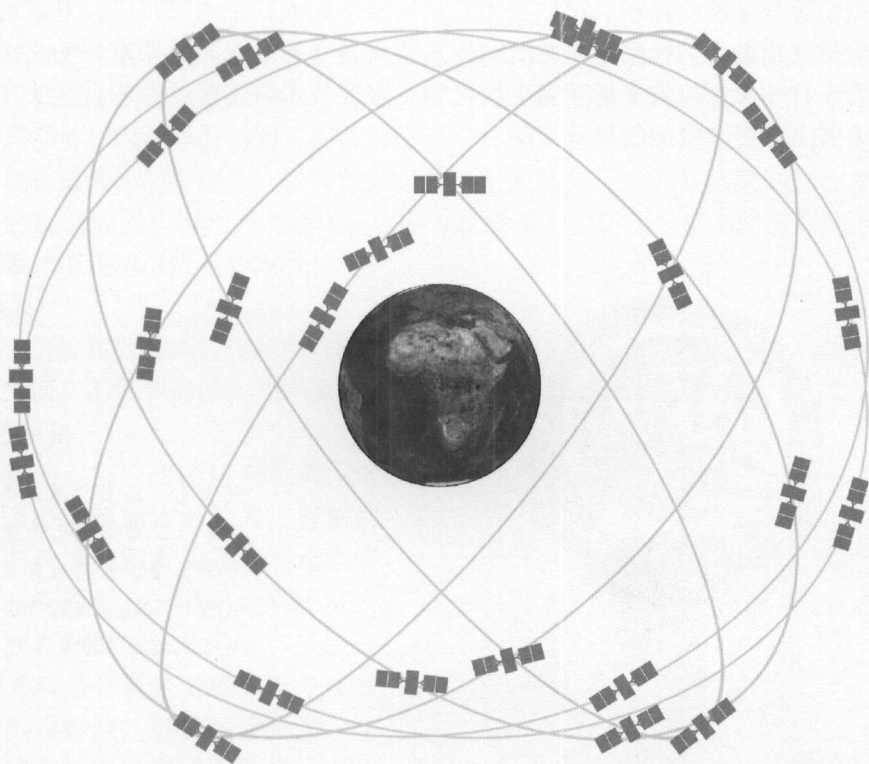


图 5.31 GPS 系统中的 24 颗卫星 (图片来源: gps.gov)

获取绝对位置状态信息的主要途径是卫星定位系统，在无人机领域常用的几大卫星定位系统包括美国的 GPS，全称 NAVSTAR GPS (Navigation Satellite Timing and Ranging Global Position System)；俄罗斯的 GLONASS；我国的北斗卫星定位系统。此外，世界上的卫星定位系统还包括欧洲的伽利略系统，日本的准天顶系统，印度的 IRNSS 等。

卫星定位系统给无人机提供的不仅是三个绝对位置状态信息：经度、纬度、高度信息，还包括无人机在当下的三个速度状态向量。而位置与速度是任何运动系统最核心的两类状态信息，整个运动过程都是围绕它们展开的，由此可见卫星定位系统在无人机反馈模块中的重要地位。卫星定位系统在无人机使用上会面对两个问题，一是信号强度，二是定位精度。

任何无人机产品，在正常使用时都需要满足“星数”要求，同时在室内，高架桥下或其他特殊环境中，卫星信号可能会变得非常弱，而由于位置状态和速度状态实在是太重要，一旦无人机丢失掉这两类状态信息，马上会无法控制，而无人机运动速度非常快，根本无法承受哪怕很短暂的外环状态缺失。因此无人机系统的卫星定位硬件往往会在设计上进行多余度准备，如某些卫星定位硬件既支持 GPS，也支持 GLONASS、北斗系统等，或者同时支持多个

频段的卫星信号接收，这就使得在某些情况中，某一种卫星定位系统的某种信号微弱到无法使用时，定位系统可以迅速切换或者直接检测到其他定位系统的信号，保证整个系统持续反馈状态信息。

如果所有卫星定位系统的所有信号都丢失了呢？这种情况在很多行业应用中是无法忽视的存在。在此种情况下无人机必须借助其他辅助传感器，通过相对位置，相对速度来反馈状态信息，实现位置与速度的控制。比如当无人机从室外切入到室内飞行时，卫星定位信号全部丢失，这时就要借助之前提到的相对测距传感器来进行悬停或其他要求下的状态控制。然而当下还没有一种相对定位技术能够完全取代卫星定位技术，这些硬件或者算法在精度与稳定性，实现方式上还有非常大的提升空间。



图 5.32 得益于硬件小型化与低成本，卫星导航已走进普通人的日常生活。上图为集成了卫星导航模块 u-blox NEO-M8 与强磁计的常见无人机导航单元

在定位精度方面，以 GPS 为例，由于定位精度太高，在民用领域被加入人为限制，现在开阔地域的定位精度基本可以保持误差在 5m 左右。这个定位精度加上无人机本身控制器中的滤波与控制算法处理，机械云台稳定控制，基本满足消费产品的使用需求。但在工业领域更高精度的要求下，还可以通过使用差分 GPS（DGPS）技术实现更高精度的无人机定位。

但是大家可能会有一个疑问，既然 GPS 系统能够提供载体的三维数据（经度、纬度、高度），为什么在无人机定高时还要使用气压计、超声波、红外等辅助系统呢？相比于其他两个方向的定位而言，无人机系统的高度定位很“漂”，这是为什么呢？

其实普通的 GPS 高度定位是非常不可靠的，本质上是由于 GPS 所测得的数据和坐标系之间的关系。GPS 系统可以通过数据转换获取经度纬度，而在地球表面经度纬度的标定是统一的，但高度该怎么算呢？海拔，确实如此，海拔是相对于海平面的高度，但它对于整个地球并不是统一分布的。因此需要结合相对定位数据来直接获取无人机所在位置的海拔高度（气压计）和相对地面高度（超声波、红外等），详细内容会在下一章第二节坐标系数据转换中进行论述。

对于爱好者而言最需要注意是在放飞无人机前对环境进行详细排险与规划,分析飞行环境中可能会给 GNSS 系统带来影响的因素,并进行有针对性的方案制定。在安装无人机时尤其注意安装操作、布局、整体设计中 GNSS 信号的强弱。

5.5 动力系统

对于四旋翼无人机或者其他多旋翼无人机而言,动力系统都是需要重点考虑的部分,也是整体无人机性能优化的重要环节。动力系统在无人机中扮演着多重角色:它是无人机控制的最终实现环节,因此会限制无人机自动控制的响应速度、控制性能等。同时它也是多旋翼无人机系统中最大的能耗部分,如果撇去有效负载的部分,动力系统的能耗往往要占去整个系统能耗的 80% 以上。因此无论是从优化控制效果的角度还是从提高能量利用率的角度,无人机动力系统都是不可绕过的环节。

1. 旋翼

对无人机旋翼的选择往往是项目需求进行实现的第一步。任何飞行器的旋翼都至少需要关注三个方面:①翼型选择;②旋翼扭矩;③旋翼升力计算。

1) 定距桨

多旋翼无人机往往使用定距桨,定距桨的含义是桨距固定的旋翼,旋翼的升力计算与旋翼桨距有关系。与定距桨相对应的是变距桨,变距桨是桨距可变的旋翼,如直升机主旋翼通过“变距输入”控制挥舞角,调整主旋翼升力在各个方向上的投影量。对于四旋翼无人机而言,采用定距桨使我们不将桨距看作输入变量,而使其成了一个常量,从而降低了多旋翼无人机的控制难度。但天上不会掉馅饼,多旋翼无人机操作难度的降低是以牺牲控制灵活性为代价的。

2) 正反桨及反扭矩计算

为什么采用正反桨?联想前面章节中的机型原理,对于旋翼飞行器而言,区别无人机类型的重要参考是看它们如何实现扭矩平衡。多旋翼无人机飞行时,桨叶会在旋转面上产生一个力矩,这个力矩会导致多旋翼无人机在偏航方向上发生姿态变化,因此多旋翼无人机需要两两成对(特指四旋翼,如果是八旋翼或十六旋翼可以理解为偶数成对)向不同方向旋转,以便利用这种偏航方向上的扭矩进行姿态控制或保持平衡。单片桨叶的扭矩计算公式在日常使用时可以简化记忆如下:

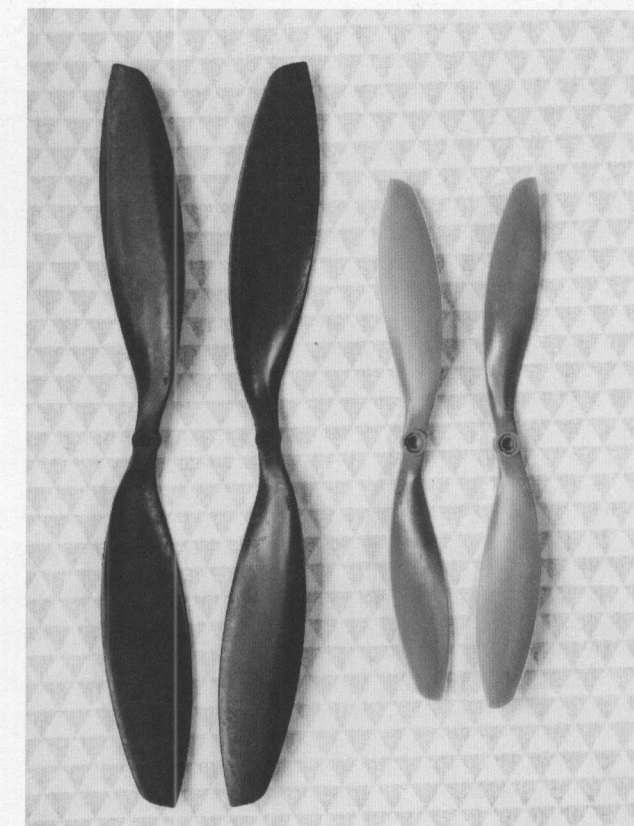


图 5.33 1447 与 1047 定距桨

$$Q_i = d_i \Omega_i^2, \quad (5.1)$$

其中 Q_i 是我们关注的反扭矩（单位： $N \cdot m$ ）； d_i 为某个正常数，该值由定距桨本身决定； Ω_i 为定距桨转速（单位： rad/min ）。读者在工程使用中只要记得这个反扭矩与旋翼转速的平方成正比就可以，由于旋翼转速一般都非常快而转速的平方无疑就更快了，从这里也可以看出多旋翼无人机姿态变化是非常迅速的。

3) 旋翼升力计算



图 5.34 读者可以把公式 5.2 中的各个参数带入到这幅图中的小型四旋翼遥控飞行器，默想公式中参数与该图中哪部分对应，来体会实际系统与理论公式的关系（图片来源：pixabay）

在进行无人机设计时，需要结合实际应用任务，按照有效负载进行无人机电重计算，根据有效负载的重量要求推算无人机升力。单片定距桨旋转升力计算公式：

$$T_i = C_T \rho A (\Omega R)^2, \tag{5.2}$$

其中 C_T 为升力系数，一般从旋翼生产厂家或无人机制造商给出相应的参数表查询， ρ 为空气密度， A 为定距桨旋转面积， R 为定距桨半径， T_i 为第 i 片定距桨所产生的升力。空气质量与旋翼无关，旋翼扫过的面积如果简化为 πR^2 则升力与旋翼半径的四次方、转速的平方成正比，读者可以将这样具体阶次的比例关系直接应用在实际项目的计算中。

同时其中很多参数如螺旋桨旋转面积，转速，旋翼半径都为已知参数，读者在平时应用时可能非常熟悉某些旋翼的具体参数，在外场进行实验计算时也可以直接采用下面的公式口算：

$$T_i = k \Omega^2, \tag{5.3}$$

其中 k 是一个与定距桨本身相关的正常数，也就是之前叶素法公式中已知参数的乘积。这个工程化的公式方便在哪里呢？它将旋翼相关参数简化为比例系数，对于长期从事设计的工程师或者现场操作人员而言，可以在无人机飞行现场快速计算无人机升力无疑是非常有利的。（请思考问题：在你的无人机操作飞行中或项目实验中如何使用上面的公式？它们能带来哪些好处？其中哪些参数对于你的应用格外重要？）

2. 无刷电动机

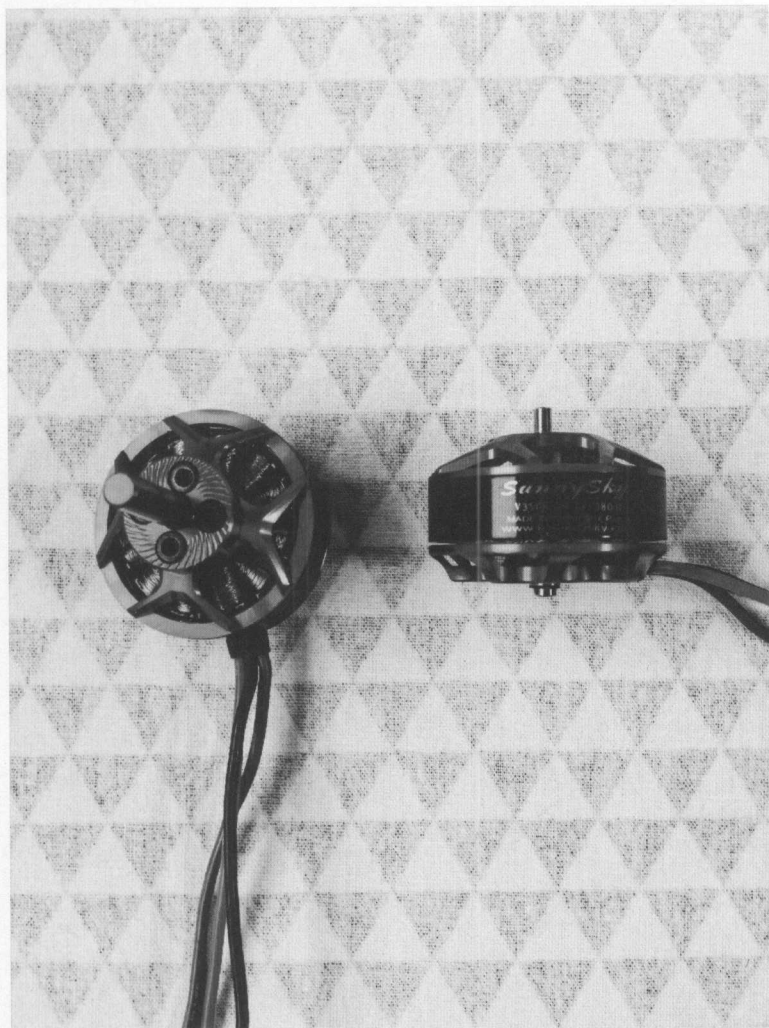
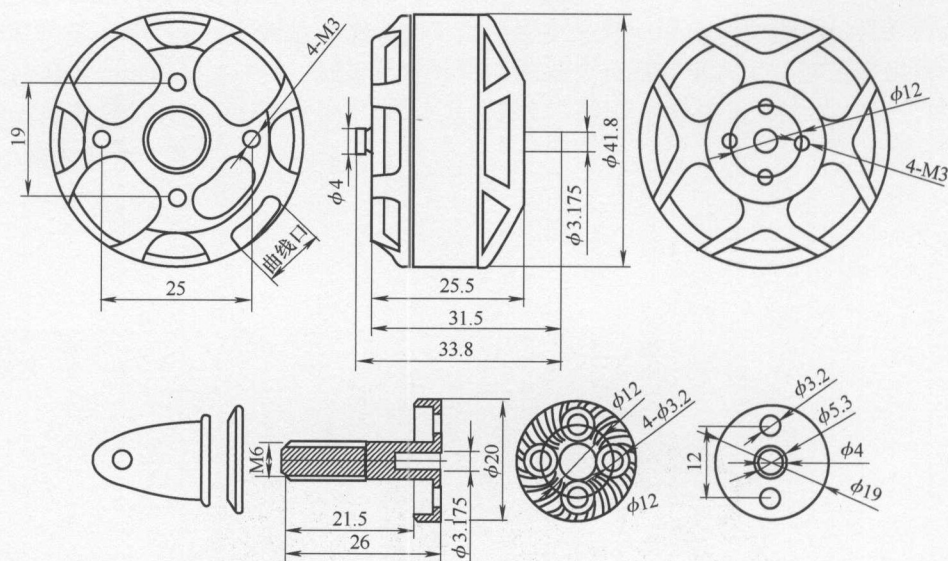


图 5.35 3508-380KV 无刷电动机

常用的动力器件及具体组成根据无人机机型的不同而有很大区别。比如固定翼型无人机采用伺服舵机控制副翼、升降舵等变化；直升机型无人机采用舵机控制自动倾斜器，最终实现对主旋翼总距、周期变距的控制；涵道无人机通过伺服电动机控制导流板，引导旋翼推送气流来实现姿态控制。而多旋翼无人机则采用无刷电动机驱动定距桨，为无人机提供所需要的升力或姿态控制力矩。

不仅是无人机系统，很多硬件系统中具体的硬件信息都可以直接通过“说明文档”或者对应的“使用手册”获取。（请思考问题：还有哪些硬件手册是你经常使用的？你对于这些手册的阅读习惯是怎样的？）这些手册内容可以作为制作或设计时的参考资料，也可以提示我们哪些数据对于该种硬件而言是最为重要的，这对无人机的制作、设计、研究会起到一定的指导作用。对于有经验的工程师而言，几乎可以通过这些手册获取所有必要的知识，因此养成手册阅读习惯，并逐渐适应、培养阅读手册的能力，这对于任何领域的硬件工程师而言都是非常重要的。

关于多旋翼无人机使用的无刷电动机，我们应该关注哪些参数呢？其实电动机厂家已经为使用者考虑得很周全了。



Stator Diameter	35mm			定子外径
Stator Thickness	8mm			定子厚度
No.of Stator Arms	12			定子槽数
No.of Stator Poles	14			定子极数
Motor Kv	380			电机KV
No-Load Current(A/10V)	0.1A			空载电流
Motor Resistance	0.28Ω			电机电阻
Max Continuous Current	15A/30s			最大连续电流
Max Continuous Power	320W			最大连续功率
Weight	106g			重量 (含长线)
Outside Diameter	42mm			转子直径
Shaft Diameter	3.175mm			出轴直径
Body Length	25.5mm			电机长度
Overall Shaft Length	33mm			电机含轴总长度
Max Lipo Cell	6S			最大电池节数
Recommended Prop(inch)	APC11×4.7	APC1447	DJI1555	推荐螺旋桨规格

图 5.36 朗宇 Sunnysky3508-380KV 型无刷直流电动机的尺寸结构图和参数表 (图片来源: rcsunnysky.com)

城堡会以图 5.37 中的无刷电动机参数为例,跟大家分享如何使用这些信息,或挖掘出更多的内容,其中的方法比某一个具体项目的实现更为重要。

首先来看看有哪些需要重点关注的参数

1) 电动机型号: 3508

在选择多旋翼无人机使用的无刷电动机时,型号参数是很多读者遇到的第一个问题,与网络卖家联系也需要用专业词语进行沟通,如果读不懂型号,是一件很麻烦的事情。以 3508 为例,眼尖的读者可以从参数列表中看到“定子外径: 35mm”,“定子厚度: 8mm”,连起来就是 3508。其实就是这么简单,电动机的型号通常是按照定子尺寸命名的。

2) KV 值: 380KV

喜欢航模的朋友对“千伏值”这个词一定不会陌生,“千伏值”对应的参数名称就是 KV 值,它的含义是指无刷电动机外加 1V 电压时,每分钟的空转转速。以 380KV 为例,外加 1V 电压电动机空转速度为 380rpm。对于无刷电动机而言该参数值越低,能驱动的定距桨尺寸也

就越大。

3) 推荐螺旋桨规格

对于爱好者或无人机使用者而言，电动机厂商提供的这项数据会给整个设计省去相当多的麻烦。由厂家提供的参数基本上是值得信赖的（就算有些厂家偷懒，也会照搬比较靠谱的数据加在自己的产品手册表格中），因此从上面的参数列表中，大家可以直接选择与 3508-380KV 无刷电动机相匹配的推荐旋翼尺寸：APC1147，APC1447，DJI1555。（请思考问题：这些参数在你的项目或工程中如何使用？其中哪些参数需要特别注意？）

3. 电子调速器

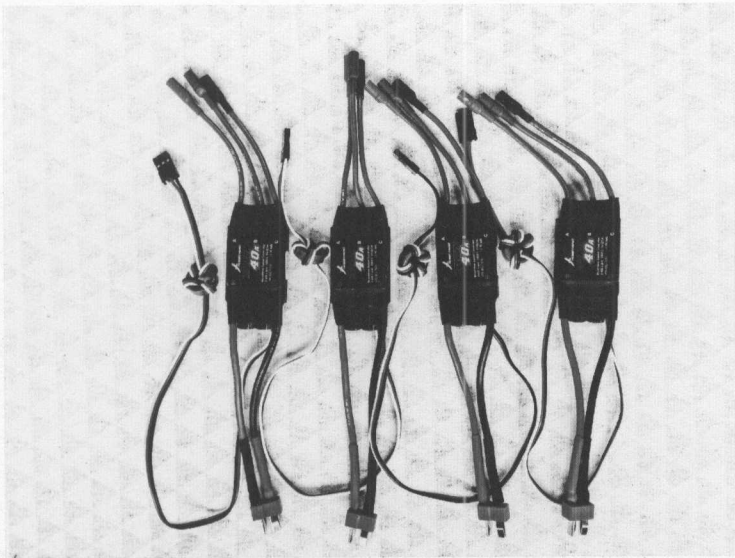


图 5.37 电子调速器

电子调速器（ESC）简称电调，它的作用是将飞行控制系统中控制器计算出的包含控制指令的直流电信号转化为含有特定脉冲的交流电，从而驱动无刷电动机按照飞控算法旋转。

电调的结构一般包括控制电路以及数据线。数据线有三种：电源输入线、交流信号输出线和信号线。电源输入线与直流电源相连，为电调提供所需要的电能。交流信号输出线与无刷电动机相连，用来输出交流脉冲调节无刷电动机转速。信号线接控制器模块的输出端口，用于接收从控制器发出的控制指令信号。有些电调的信号线具备 BEC 输出，可以向外输出稳定 5V 电压，从而为控制器等原件提供所需的电能。爱好者自己组装无人机时要特别注意所选择的电调是否具备 BEC（Battery Elimination Circuit），以免购买之后发现与期望不同，就会浪费大量时间。（请思考问题：电子调速器的输入

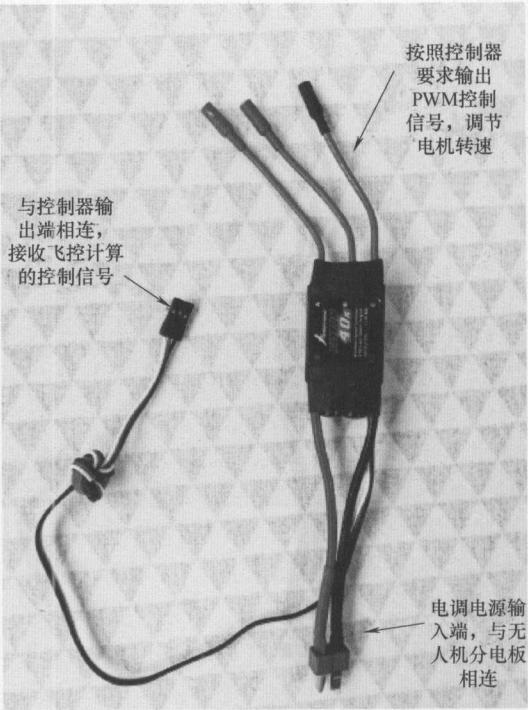


图 5.38 ESC 接口功能与连接说明

输出信号分别是什么?)

在选择电调时要注意的参数是电调电流值。无人机玩家一定经常看到电调外包装上标注的 40A、60A 等参数。根据电流以及电调本身的输入电压值我们可以得到电调功率 $P = UI$ ，这个功率值需要与无刷电动机的功率参数匹配。最好要留有一定裕量以确保电动机大功率运转时不会烧坏电调。

至此无人机动力部分的主要内容已介绍完，然而获得知识与使用知识还有一小段距离，本书的设计章节将给出系统设计与选择的注意事项。

5.6 机身

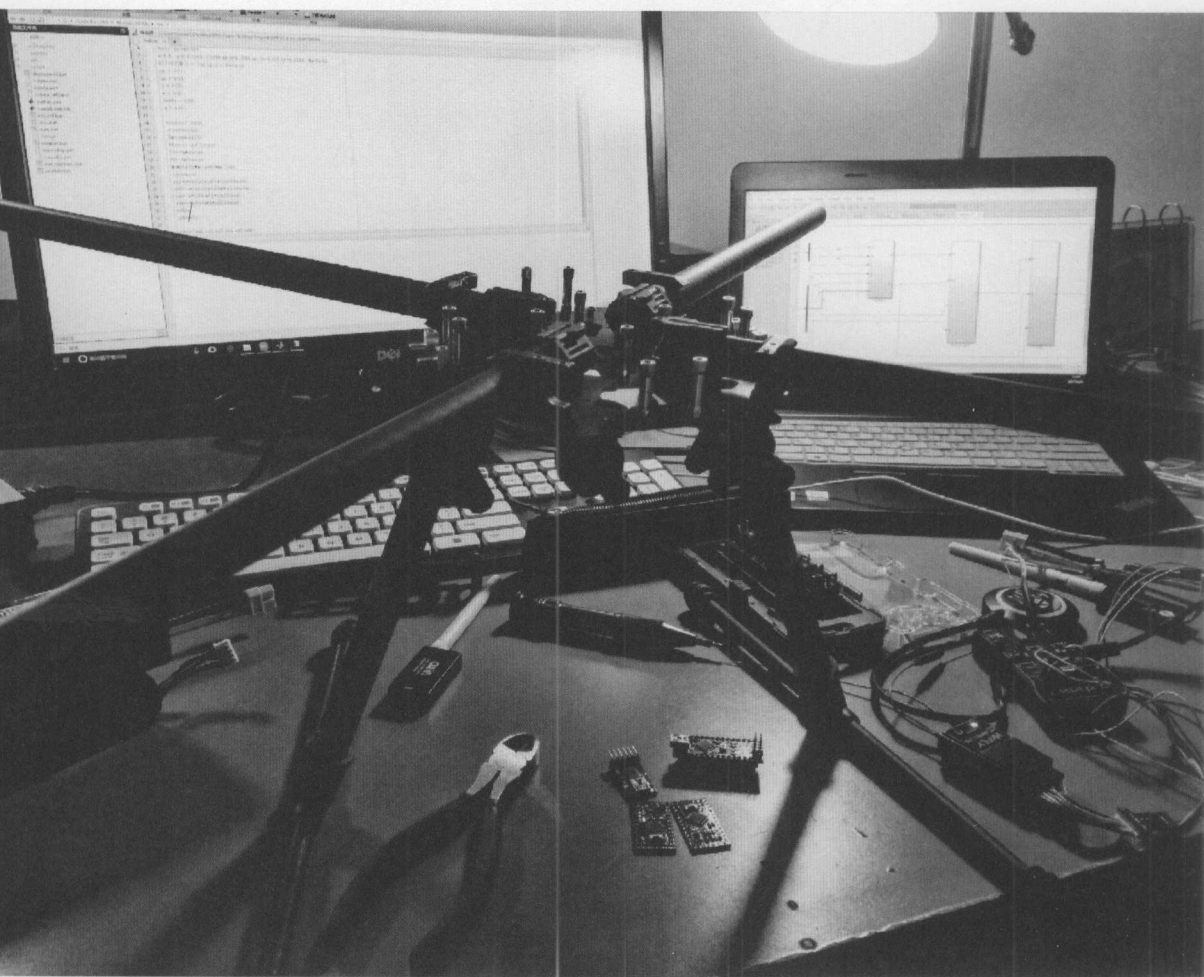


图 5.39 四旋翼无人机套件中常见的机身结构

很多爱好者对于电子器件比较关注，但对无人机机身重视不够，而机身所涵盖的内容、范围、知识深度都不容小觑。选择合适的机身可以使整个无人机系统效率倍增，且会让安装、调试过程变得简单有趣。与此相反，糟糕的机身选择可能瞬间拉低整个系统的性能，丢失的绝不仅是无人机的“颜值”。

无人机的机身需要考虑材料选择、安全性等因素。在系统设计时，也要根据动力部分选择合适的机身尺寸和结构。无论是选购成品套件还是自行制作，都要对无人机机身的整体布局：中央机架、载荷区、分电板、旋翼臂、起落架等进行合理的选择搭配。（请思考问题：你在工程项目中或无人机产品购买时是如何设计或选择机身的？设计标准或选择标准有哪些？）

1. 自制与选购

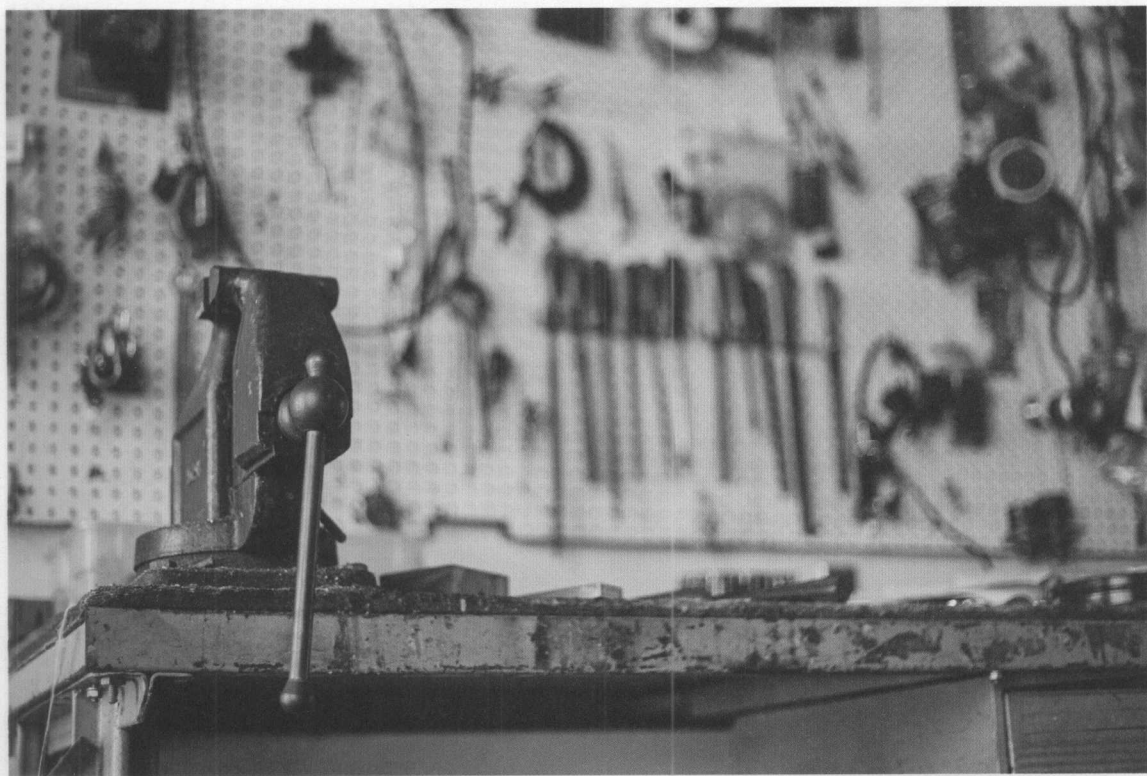


图 5.40 DIY 需要的大量空间、工具、设备，这些对于大多数国内读者而言，是比较难于实现的
（图片来源：pixabay）

很多国外的无人机 DIY 书籍或机器人制作书籍都会侧重于制作过程的介绍，往往会把较大的篇幅用在无人机各个部分的素材制作，以及各种相关制作工具的介绍中。国外爱好者或无人机同行的动手能力确实值得我们努力学习，但任何知识、指导、实践内容还是要回归到国内读者具体的情况上来。一方面考虑读者自己的情况，自行制作是否能够实现，另外一方面这样的实现是否有足够的意义，要在做之前仔细权衡一番。不然很多事情开始时兴致满满，最终只落得半途而废，这样的经历只会不断增强在未来各项事务上选择放弃的心理暗示。

首先国内的居住环境并不适合普通爱好者自制无人机机身或其他部分。这些制作活动需要用到相关的专业设备，而这些设备成本很高，往往要占用很大空间。国外的爱好者或者独立设计师可以在自家的地下室或者车库内进行制作，这些场地空间很大，能够放下各种专业工具如电工工具、3D 打印机、小型加工机床等。而国内工程师，往往集中在北上广深几个城市，在这样的城市中拥有这样的私人空间布置加工设备是不太现实的。对于研究人员或企业工程师，往往会有公共制作空间，但设备种类，工作内容都会纳入统一安排，很少会允许个人进行自由发挥。

其次，无论什么身份，什么职业的读者，城堡都建议把主要精力放在自己的专业领域里，毕竟每个人的精力与时间都是有限的，能够加入一个团队，或者通过购买、开源等途径借助别人的专业力量完成设计，努力在自己的专业方向或职业发展方向上不断投入才是最高效的选择。（请思考问题：你的主要精力应该放在哪些方面？你计划怎样在这些方面投入时间？）其实任何制作，任何技能，只要肯花时间，没有学不会的，等到学会之后还是需要时间不断磨练达到“手熟”的境界，而对于每个人来说，时间是最大的资本，我们不能盲目投资，需要在核心竞争力上不断取得突破。

如果一些读者确实有着非常充足的客观条件，并且非常喜欢并能享受自己动手制作的过程，这种情况下，能够把制作流程走一遍，相信一定能够收获很多经验、感触、快乐。另外相比于以往，当下科技环境的进步使无人机机身或其他硬件部分的制作方便了很多，既可以全手工打造，也可以购买类似 Maker Beam 上的模块化组件“积木木”，还可以通过互联网下载素材库或完整的模型文件直接进行 3D 打印（请思考问题：哪些无人机工程环节可以使用 3D 打印？如果让你选择，哪些设备对于无人机工程项目而言是必不可少的？为什么？），总之各种选择也确实方便了核心爱好者。

2. 机身材料



图 5.41 航空工业应该是最早使用复合材料的行业之一，空客 A350 中复合材料占比在 50% 以上
(图片来源：pixabay)

无人机要根据任务要求进行设计。无论是无人机生产厂家、创业团队、爱好者、行业应用者还是工程师，都希望无人机材料既轻便，又结实，韧性好，绝缘性好，耐热，耐腐蚀……然而这样的材料对于飞行高度达到对流层或平流层，飞行速度突破音障的空天飞行器与续航不到半小时，飞行高度一般在百米左右，飞行速度被强行限制在 20m/s 以内的四旋翼无人机系统，其价值一定是不相同的。绝对意义下的最优没有意义，在各种约束条件、成本考量、任务限制下产生的“最合适”才是在具体环境中“最优”的真实体现。

对于无人机爱好者，拆卸方便，结构布局简单直接，价格合理的多旋翼机身可以作为首选。而对于在无人机厂家工作的工程师、设计师而言，要能够根据自己的核心竞争力进行有的放矢的选择，比如本公司整体或者当下产品项目的技术重点在飞控或智能算法方面，或者在某一项传感器上，那么无人机机身材料的选择能够满足基本的消费产品需求和行业标准即可。这一方面有助于缓解公司或项目团队的生产链的压力，另一方面有助于将更多资源、精力投入到核心环节上，快速实现项目推进或产品迭代；对于科研机构内的研发人员，如果研究内容涉及到无人机和相关材料的交叉领域，那么机身部分是重点研究对象，至于无人机系统的其他组成部分只要满足系统实现就可以了。



图 5.42 无论是 DIY 配件还是厂家无人机产品，都已广泛使用碳纤维材料，熟悉常见材料的基本性能是无人机工程师的必修课

无人机机身常见的材料主要包括金属材料，高分子材料中的各类塑料、纤维等，有时木材也会被用在无人机制作中。根据无人机机型选择的不同，使用的材料也往往存在差别，如在固定翼无人机中，最常见的材料还是泡沫塑料，这种材料非常轻便、便宜而且易于制作与

修复。固定翼无人机不具备定点起降能力，在降落时往往会给机身带来一定磨损，这时在飞机底部贴一些胶带可以方便地起到保护功能。而在多旋翼无人机中常用材料如铝制材料、碳纤维材料、玻璃纤维材料等，这些材料相比于泡沫塑料而言具有更高的硬度，然而炸机事故发生后一旦造成这些材料的损坏，再想修复就不那么容易了。

特别提醒读者在进行机身选择时需注意材料的导电性。记得有一次，在实验室里，一名师弟在平衡仪上调试八轴多旋翼时整个无人机突然烧了起来，呼呼的火苗让人印象深刻。事后师弟不无愧疚的总结原因：原来他忘记检查机身的导电性，而那次实验中使用的无人机机身材料正好是某种导电碳纤维，他在调试电路板时没有据此做好绝缘措施从而导致这次事故。安全在整个无人机系统设计和工程实践中都是至关重要的。

3. 中央机架

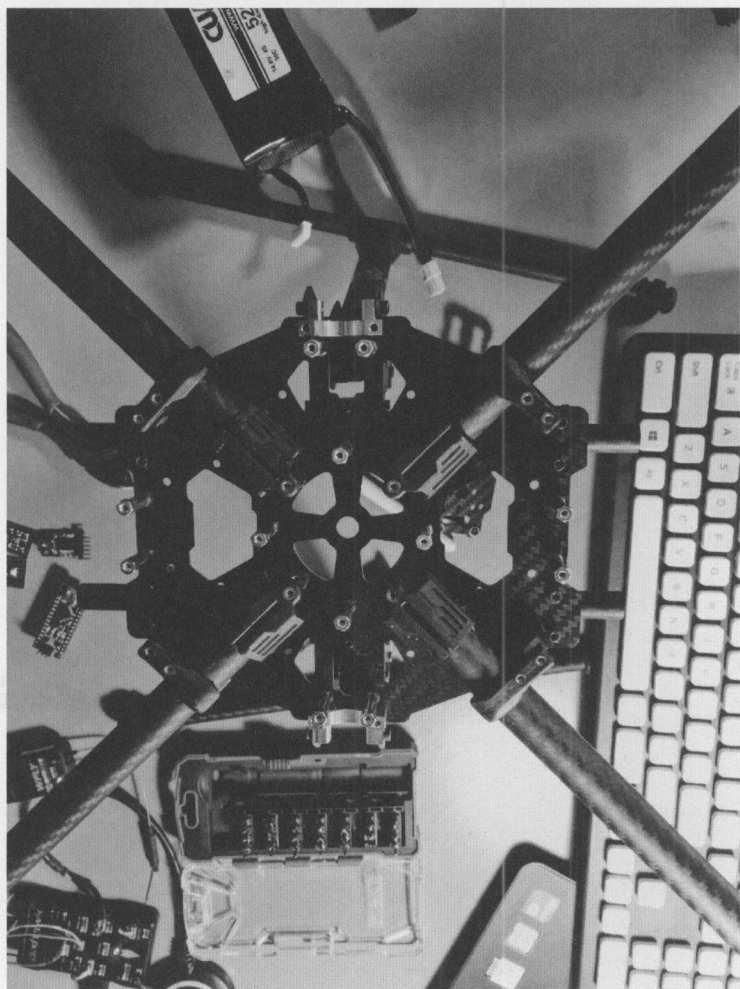


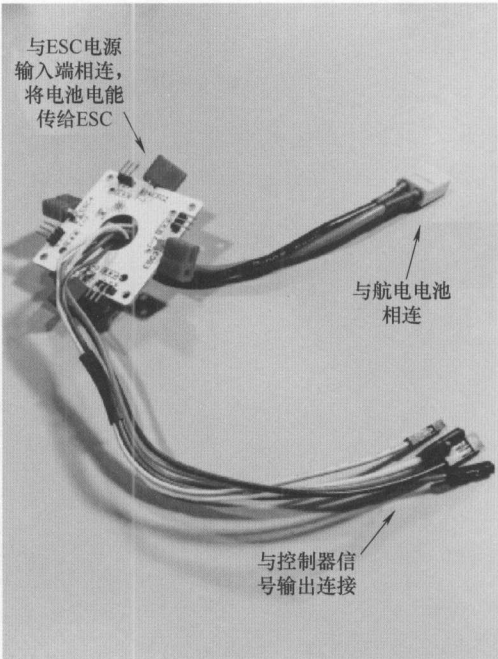
图 5.43 中央机架的结构，形状根据机身产品而各有不同，它承载了除电动机、旋翼、电调以外的部分，值得每位设计者认真对待

中央机架是多旋翼无人机安置飞行控制系统、能量单元、有效负载等模块的核心部件，导致该部分电路接线比较复杂。同时它也是整个系统主要的承重区域，矛盾之处在于该部分的实际空间往往不大，整个多旋翼无人机空间主要是由旋翼臂占据的。在一些多旋翼无人机机身产品设计中，旋翼臂的材料可能与中央机架不同，而中央机架集中承载了控制模块，能量单元等，一旦发生短路等事故，后果将不堪设想。

另外在选择无人机机身时，需要考虑中央机架的扩展能力。有些无人机机身产品提供了中央机架的模块化设计，以方便不同用户根据任务需求与有效负载进行针对性选择。

4. 分电板

图 5.44 分电板的外形、功能、接口等有各种各样的设计方式，读者需要按照自己的无人机机身或飞控系统选择合适的分电板



看似不起眼的分电板很容易对读者的 DIY 过程造成干扰。不同的多旋翼机型对于分电板的设计实现往往是不完全相同的。有的多旋翼机身将分电板的功能直接在中央板上实现，使中央板可以向外输出电能。但还有一些多旋翼机身会更加注重空间利用率及整体结构的稳定性或可扩展性，中央机架不具备分电板的能力，这时需要读者自己制作或购买尺寸相符的分电板。因此仔细阅读机身参数，了解机身产品的实际结构是前期工作必须完成的环节。

5. 旋翼臂

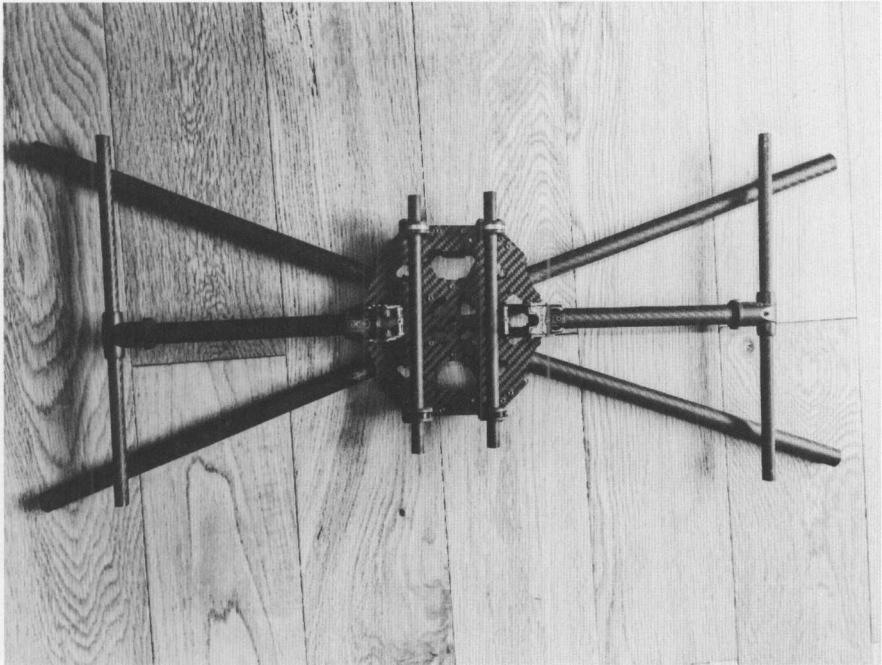


图 5.45 可折叠机身向我们展示了在整个无人机机身结构中，中央机架部分的可用空间是多么有限

多旋翼无人机的旋翼臂直接搭载动力系统的全部模块：多旋翼定距桨、无刷电动机、电子调速器。同时旋翼臂是无人机的主要空间占用模块。“一动一静”充分反映了旋翼臂在无人机机身结构中的重要地位。

当下多旋翼无人机的旋翼臂设计方式按照是否可折叠分为两类：Yes、No。不可折叠的无人机旋翼臂提供更为稳定的飞行性能，但对于有便携要求的个人消费者而言实在是很不方便，在一些行业需求中，多旋翼无人机的旋翼臂数目，机身尺寸比消费级四旋翼无人机大出很多，而占据空间的主要部分就是外伸的旋翼臂，使得该类无人机的运输面临着很大问题。

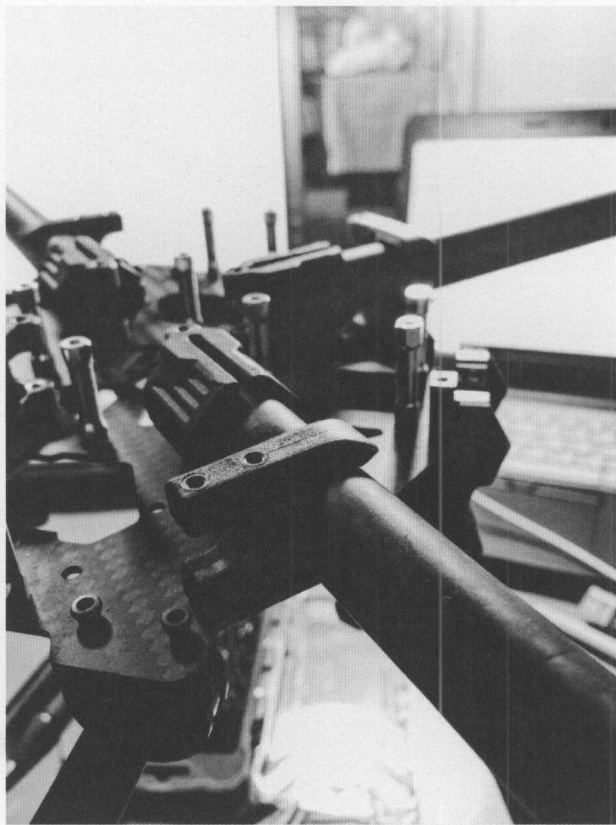


图 5.46 任何使用具备旋翼臂折叠功能无人机的读者都有必要在起飞前进行认真检查

正因消费级无人机与行业级无人机都对便携性有一定要求，旋翼臂的折叠功能也自然而然地成为很多厂家在产品中标榜的卖点。由于多旋翼无人机的整个动力系统都安装在旋翼臂上，无人机进行姿态变化时产生的扭矩很大，快速姿态控制所带来的震动也非常明显，因此对多旋翼无人机的旋翼臂有着很高要求，可折叠的无人机旋翼臂结构在这一方面显然会带来一些麻烦。当下市面上常见的设计方式是采用机械防松卡扣，但在这样的设计中会对无人机哪些飞行品质造成影响？影响的程度有多大？在不同飞行情况下这些影响是否一致？很多无人机厂商虽然推出了相关产品但却没有给出回答上述问题所必需的明确数据。

如果一些读者朋友计划进行无人机 DIY，并且打算选择可折叠的无人机旋翼臂，就要注意在无人机起飞前检查折叠部是否松动，以免随着使用时间的增加而导致的机械卡扣老化，一旦多旋翼无人机的旋翼臂在飞行中出现问题的发生飞行事故是十有八九的事情。飞前检查习惯的养成对于无人机行业的任何参与者而言都是非常必要的，尤其是旋翼臂采用折叠设计的情况。

6. 起落架

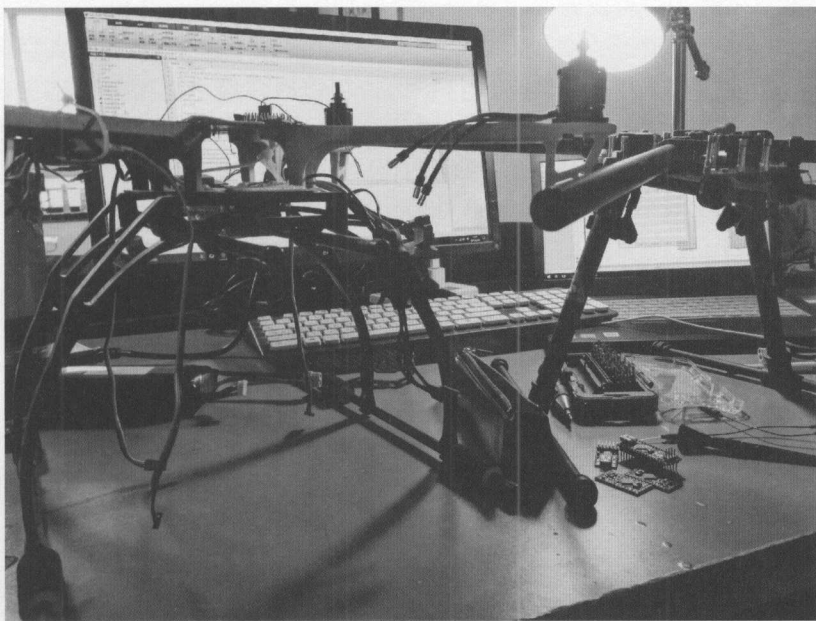


图 5.47 不同起落架在高度，材料，形状等方面区别很大，而这些区别会对无人机起飞、降落造成影响

机架对于搭载了外置有效负载的多旋翼无人机而言是非常必要的。在当下的无人机产品设计中有一些产品已经开始通过有效负载的内置设计来避开过高的起落架，然而另一些产品则通过各种结构设计优化起落架的实现方式，由此可见无人机起落架也是颇为考究的。多旋翼无人机的起落架可以分为两大类，一类具备自动收放功能，另一类则只能在起飞前、后进行折叠、拆卸或一直保持机架下放的状态。

图 5.48 本图为可折叠起落架，需要读者手动操作，自动收放起落架在连接部分通过伺服电动机实现收放动作。与折叠旋翼臂情况类似，如果读者的无人机起落架具备可折叠功能，务必在起飞前认真检查。除折叠结构处以外，还应检查起落架是否有旋转松动情况



自动收放起落架在固定翼无人机中使用的比较多，但也有一些航拍领域的专业使用者会选择该起落架。原因在于专业拍摄设备往往安装在无人机中心机架与起落架构成的独立空间

中，当无人机进行快速姿态变化时，有可能将起落架一同拍摄进图像或影像中，这对于很多专业航拍应用而言不啻为一种灾难。具备自动收起功能的起落架可以有效避免这个问题。

另一方面，起落架高度是一个需要被重视的设计参数。过低的起落架会降低有效负载的可用空间，当我们要对无人机负载设备进行扩展或更换时，较小起落架会限制选择范围。而太大的起落架则会使得无人机机身相对于地面过高，当无人机起飞或降落时，很小的姿态修正力也极易产生较大力矩把无人机“带倒”，而这时无机旋翼还未停止旋转，最乐观的结果也是定距桨磨损。因此当读者进行起落架设计或选择时，在满足有效负载空间需求的前提下，起落架短一些对于无人机的起降会更有益处。

5.7 有效负载系统

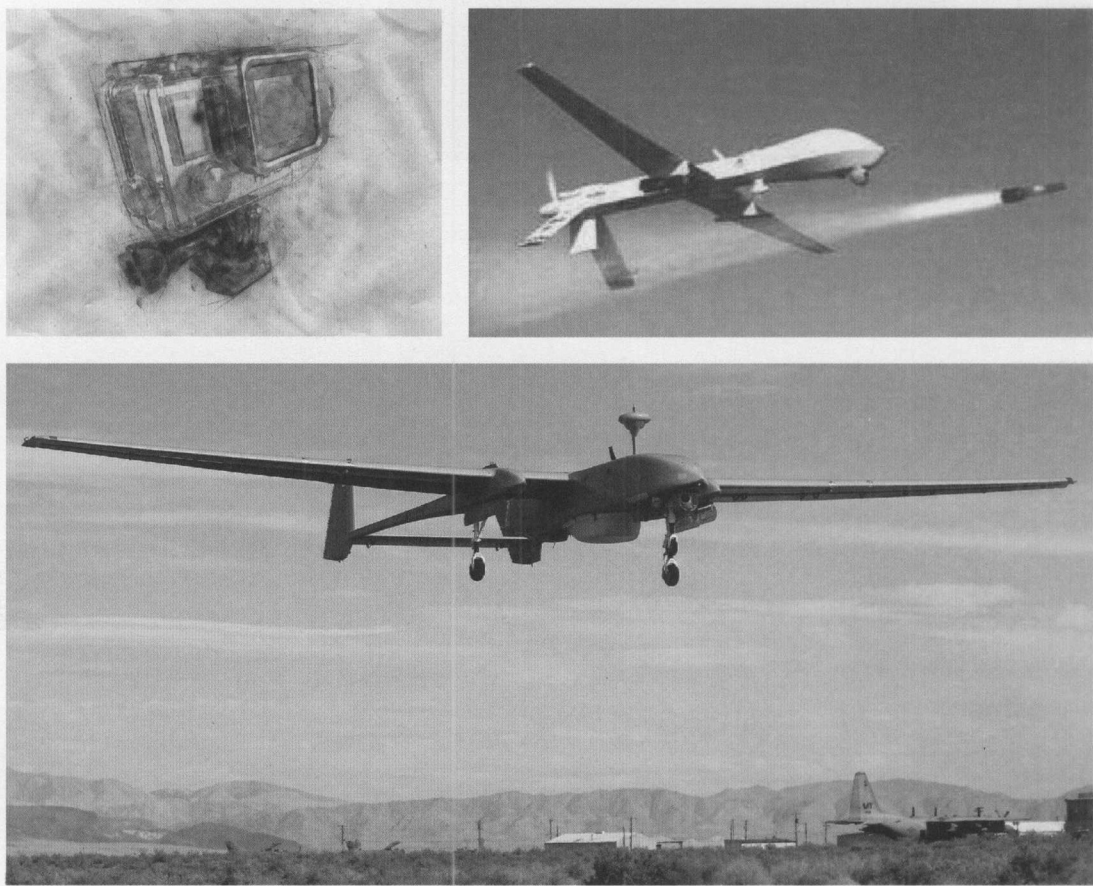


图 5.49 在某种程度上，有效负载是无人机系统与行业任务、行业技术联系最为紧密的部分
(图片来源：pixabay、维基百科)

无人机的有效负载是一个庞大的硬件群体，同时也是无人机系统中发展相对缓慢的部分。无人机的有效负载系统很大程度上是由应用行业的技术与硬件需求决定的。而当下在消费和工业应用领域，无人机是一个“新角色”，在很多应用领域中连商业模式都还不成熟，更别说相应的技术衔接了。因此有效负载系统是无人机在任何行业应用中的主要制约因素。但换一个角度看待问题，也是当下无人机行业中蕴藏最多机会的环节。（请思考问题：在你的应

用领域中常使用那些硬件设备？这些硬件设备是否可以与无人机系统结合？这种结合可以为解决行业需求提供怎样的便利？)

比如在航拍领域中，主要的有效负载系统是指与专业拍摄需求相对应的专业相机和云台系统。而在植保领域中根据无人机执行任务的不同，负载系统会有很多变化。如在农药喷洒应用中的药液箱、检测设备以及根据不同需求特别定制的各种喷嘴和配套电子机械系统等等。

因此无人机系统在进入不同行业后，整个系统的设计与完善需要与该行业的专业人士共同完成。这也是为什么很多无人机厂商虽然在消费级别应用领域中积累了大量技术与设计成果，进入行业应用的过程却依然漫长，限制它们的不只是无人机系统的相关技术，更多的是行业技术以及将无人机技术与行业需求结合的能力。换一个角度，读者完全可以在无人机行业发挥各自的专业领域知识，机会不是太少，而是隐藏的太多。

5.8 地面系统



图 5.50 MQ-1 捕食者无人机操作间（图片来源：美国军队）

无人机的地面系统可以简单称为“地面控制站”，地面控制站的功能、实现形式等根据无人机系统技术的发展以及自身的功能需求在不断地发生变化。

早期民用领域无人机系统受制于硬件价格和制造技术，没有太多传感器和控制器可供选择，无法实现当下已经习以为常的自动化或自主飞行，仅能够实现远程无线电控制。那时的无人机与现在常说的遥控飞机没有太大区别。在那个阶段地面控制站就是遥控器，将操作杆的物理位置变化转化为相应的无线电信号并向外输出，遥控飞机通过机载接收机接收到遥控器发来的信号后，将信号转化为舵机或电动机转速控制信号来实现遥控飞机的姿态控制或速度变化。

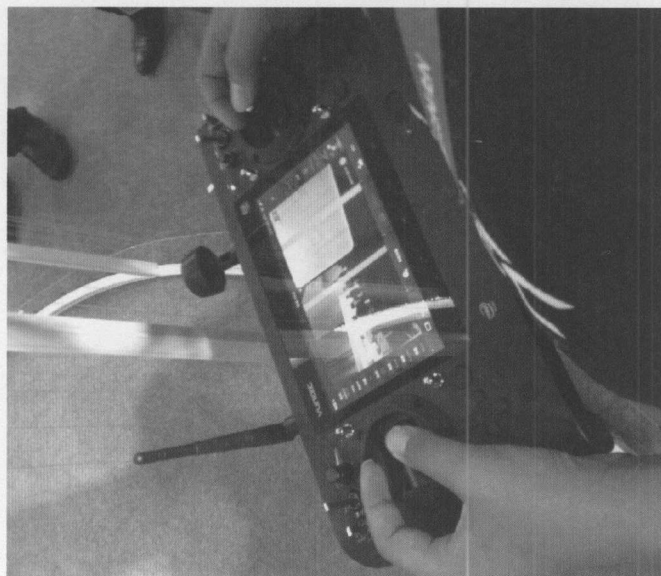


图 5.51 Typhoon H 的一体式地面控制站

随着 MEMS 技术的发展，更多硬件被加入到无人机系统中来，无人机具备了根据控制算法自动执行飞行任务和飞行模式切换的能力。在这个阶段，地面控制站逐渐转变为一个囊括地面 PC 机、遥控器、数传等众多硬件设备的大系统。功能从单一的发送姿态操作指令向系统调试、参数调整、硬件校正、飞行数据传输与展示、飞行数据在线处理、飞行模式切换等方向转变。比如当下常见的数传、图传、地面控制站式遥控器、PC 机、FPV 显示器等设备都可以算作地面系统的一种或部分。我们在 PC 机上进行算法调试，硬件校准，模式设定等，并可通过 WIFI 或数传实时发送、接收、分析、处理飞行数据；也可以通过数传、图传等设备在地面实时监控采集的数据质量，调整数据采集内容，操控无人机执行超视距飞行任务；遥控器也从单一的操作指令发送过渡到无人机模式调整，甚至有的遥控器集成了更多的系统功能，变成一个功能更加强大的复合型地面控制站。

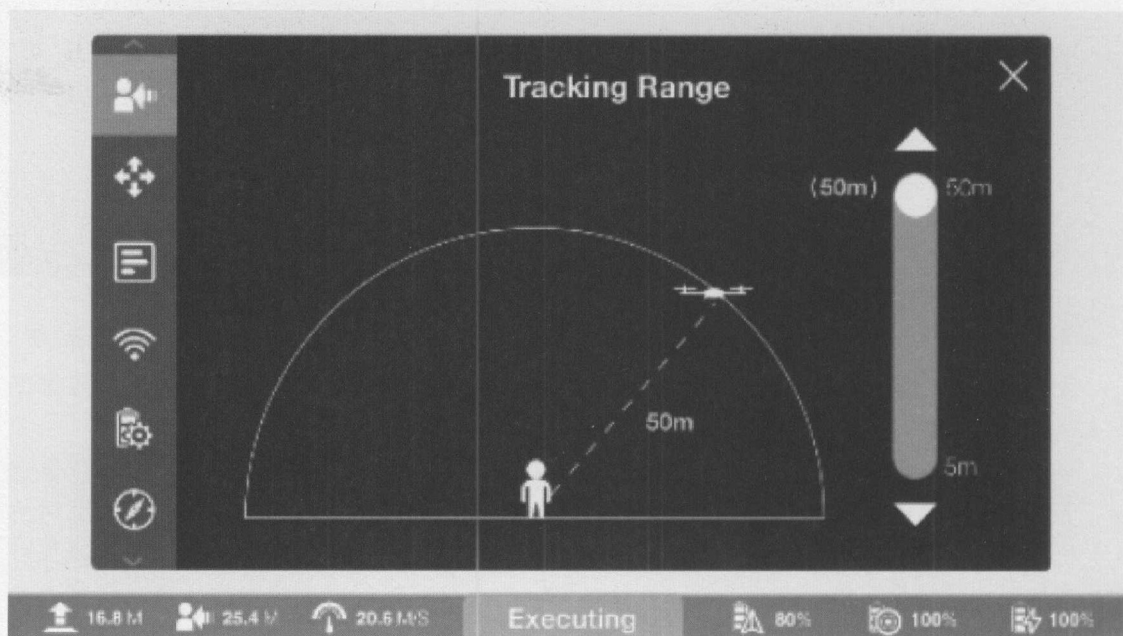


图 5.52 手机作为便携数据收发、数据处理终端已被消费级无人机广泛使用（图片来源：斯凯智能）

在这里特别提出的是，以智能手机为主的移动端地面系统。我们完全可以把智能手机归入到前面的地面控制站系统中，同时手机特有的信号覆盖范围、便携性和 APP 的多样性、灵活性等特点也使得它成为消费级无人机地面控制站选择的不二之选。虽然通过手机实现无人机控制势必面临安全性与稳定性的挑战，但手机作为个人数据处理终端的地位无疑预示着它在无人机系统中越来越重要的发展前景，现在存在的问题不正好预示着有价值的创新方向么？

5.9 能量单元

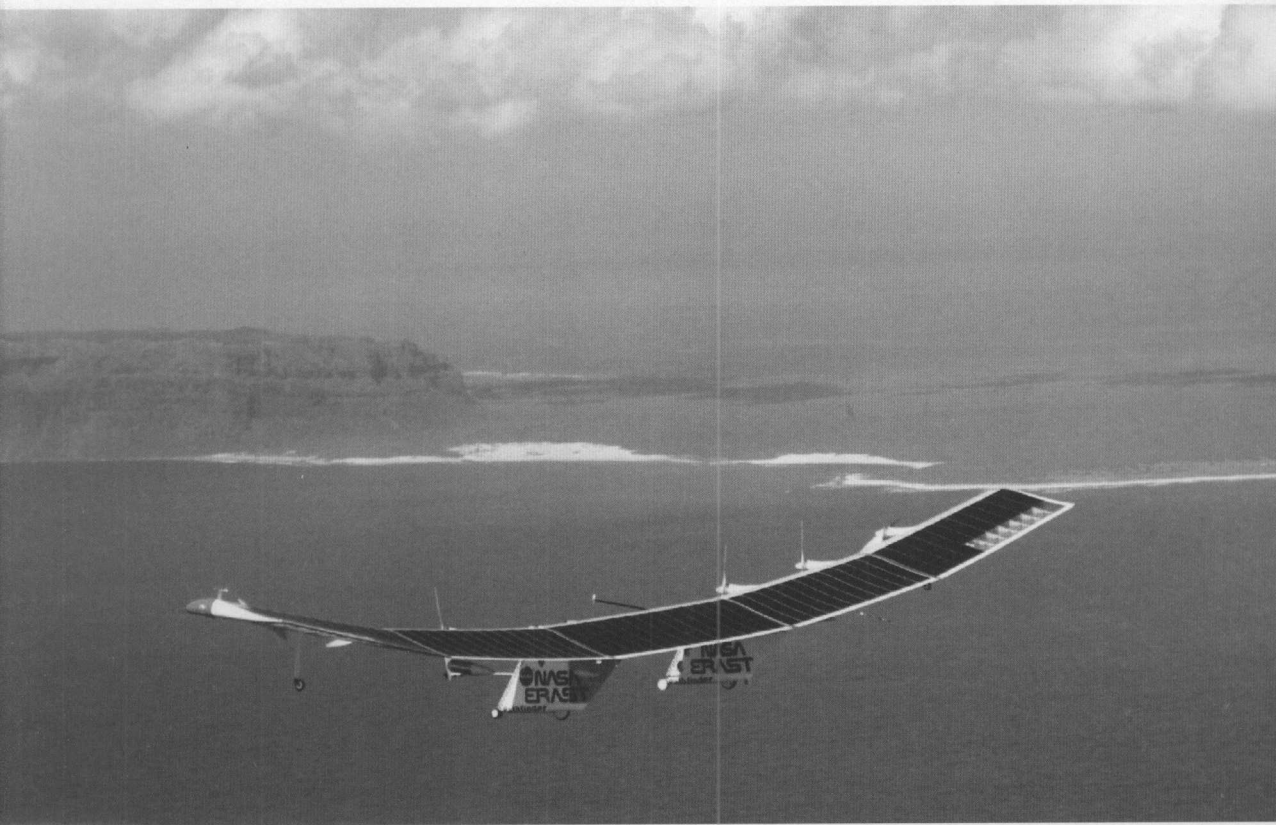


图 5.53 利用可持续能源一直是航空工业研究的重点方向之一（图片来源：NASA）

如果问到现阶段限制民用无人机发展的技术瓶颈有哪些，无人机续航能力一定排在前列。能量问题是一切电子系统都要面对的核心问题之一，无人机操作过程中最不愿意出现的情况就是飞得兴起之时，响起了低电量警报。

能量单元会直接影响无人机的性能，反过来无人机的设计方式以及任务要求、飞行环境也会影响该系统能量单元的实现能力，其中比较重要的有三个方面：①无人机机型；②任务要求；③环境情况。

无人机机型对于能量单元选择的影响主要体现在机身结构上，如多旋翼机型为航电电池的挂载提供了较为集中并且相对开放的实现环境。有些多旋翼无人机机身在设计时采用负载区域上下分层的方式，方便了有效负载和电池的安装，比如在无人机机身中央区下部安装有效负载，上部放置航电电池的结构，既可以有效减少两部分的重叠空间，又可以方便无人机系统使用者更换电池从而提高了无人机连续作业效率。



图 5.54 硝基动力 T-Rex 600 无人机 (图片来源: Paul Chapman)

如果在多旋翼无人机上采用油动系统,就会占用大量有效负载空间,同时油动系统需要无人机能够提供比较稳定的飞行运动,这会与某些需要快速姿态变化的飞行任务相矛盾。采用不同的动力系统可能需要在机身结构上进行相应的设计,如将多旋翼中常用的定距桨改为类似直升机型无人机的变距桨或者改变多旋翼的操作结构等,这些结构和操作方式的改动不利于大多操作者直接使用。

任务需求会体现在无人机本身的性能实现中,比如不同无人机系统对续航时间的不同要求,无人机不同飞行情况下对最大放电倍率的不同要求等。续航时间对无人机系统能量单元的影响是最为直接的。更长的续航时间自然要求能量单元能够提供更多的能量,可是能量是守恒的,更多能量要求势必增加能量单元整体的质量,从而增加了负载重量,又降低无人机的续航时间。这样的矛盾贯穿于无人机设计的各个层面上:更好的有效负载与续航时间;更强的无人机动力与续航时间;更大的航电电池与整机重量等。

最大放电倍率是电池的重要参数,详细内容会在后面电池参数中给出,读者在这里需要了解的是,不同的任务要求决定了无人机的飞行情况,而不同的飞行情况将决定系统对能量单元的最终要求。比如长时间匀速飞行喷灌任务与需要快速机动的无人机竞速任务在飞行状况上的区别将直接体现在能量单元的选择中。

飞行环境对无人机能量单元的影响往往是隐藏在无人机的实际使用和飞行过程中的。比

如在消费级无人机产品中，无人机的能量单元需要在家用环境下具备快充功能，在这种情况下能量单元的充电方式必须能够与居家环境中已有的充能设备对应，如一些小型自拍无人机可以通过手机充电宝或充电器来进行充电等。而在有些行业应用中，无人机的能量单元如果设计不善还可能造成重大安全事故。如在消防，安保，电力巡检等特种作业任务中，无人机面临的飞行环境与家庭环境或城市中的一般环境区别很大，比如高温、高电磁干扰、强风、高湿度等。此时能量单元的设计必须满足使用行业中特定的环境要求。又或者某项任务是在气温极低或海拔极高的环境中进行，在这些情况下无人机对能量系统的要求与一般环境差异很大。

一般市面上的航电电池（而非电池厂家专门为无人机公司设计的航电电池）从外形上看结构大体一致：电池主体、供电端口、充电端口。本节后面会从电池参数与充电注意事项两个方面介绍航电电池，前者可以帮助读者在自己的无人机设计或产品选购中做出正确判断，后者有益于读者在日常使用中对电池进行正确操作与维护保养。

1. 电池参数



图 5.55 小型无人机系统中常用的聚合物锂电池

航电电池的参数一般都会标注在电池主体的外包装上：芯数及电池连接方式；电池电压；电池容量（单位：毫安·时， $mA \cdot h$ ）；放电倍率（单位：C）。

1) 芯数及电池连接方式

航电电池是由很多电芯通过并联或者串联方式连接为一个整体的。常见的电池产品都会标定电芯数目和连接方式，如“2S”中的“S”就是英文“Series”或“Series Connection”首字母的缩写，表明该电池：由两片电芯组成，连接方式为串联连接。与串联的连接方式相对应的是并联的航电电芯，比如“2P”中的“P”就是英文“Parallel”或“Parallel Connection”的首字母缩写。在航电电池中，通过电池串联来获得更高的电池压值与更为稳定的电

路电流，常见于航拍或其他对无人机系统稳定性要求较高的应用场合。电池通过并联可以获得更大的电路电流，并以此提高电池的放电倍率，使无人机在进行大机动飞行或类似的快速响应任务时能够有足够的电流支持，常见于小型 FPV 竞速或无人机特技飞行等活动中。（请思考问题：你所知道的无人机应用领域在电池电芯串并联上有着怎样的要求？）

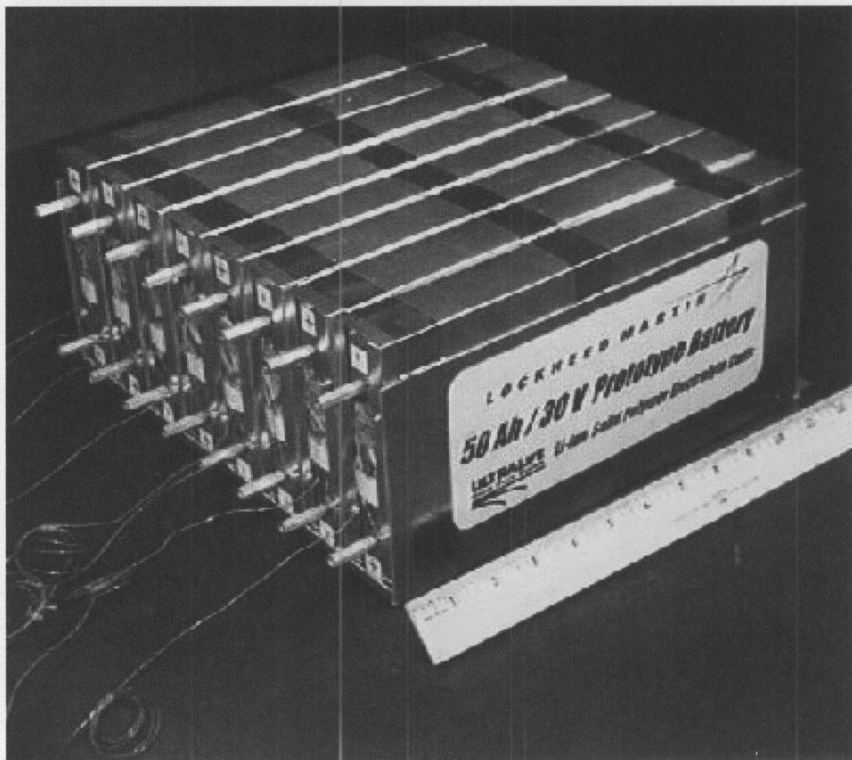


图 5.56 洛克希德马丁公司为 NASA 提供的锂离子聚合物电池（图片来源：维基百科）

电池电压

电池的电压值与芯数及连接方式是相互关联的。当下大多消费级别无人机系统的航电电池都是聚合物锂电池，每个电池芯的标称电压值一般为 3.7V，最大电压不超过 4.2V，最小电压也不应低于 3V。结合电池的串并联方式，读者可以快速估算出一块聚合物锂电航电电池的电压值。比如参数为 4S 的航电电池，电池芯数为 4，连接方式为串联，因此该电池的标称电压值应为 $3.7\text{V} \times 4 = 14.8\text{V}$ ，而对于参数为 4S2P 的航电电池，电池芯数为 8，连接方式为串并联连接，其中 4 个电芯串联成为一组，两组之间并联连接，因此整个电池的标称电压值同样为 $3.7\text{V} \times 4 = 14.8\text{V}$ ，但与第一组不同的是放电倍率或者最大输出电流会更大。

2) 电池容量（单位：毫安·时）

电池容量这个参数表明了电池在一小时内能够持续放电的电流数值大小，也就是大家比较熟悉的电荷量，在物理学中， $Q = I \cdot t$ 其中 Q 为电量，单位为库伦，简写“C”， I 为电流，单位安培，简写“A”， t 代表时间，单位秒，简写“s”。整个电池的电能总量计算公式为 $E = UQ$ 也就是电池总电压乘以电池电量，单位焦耳，简写“J”或者将上式展开 $E = UI \cdot t$ 常用单位瓦时，简写“W·h”。因此读者可以直接通过航电电池的容量参数与之前计算出来的标称电池电压来求出整个无人机系统的总能量。该数据对于无人机设计是至关重要的。（请思考问题：你能想到多少种方法来测试无人机系统的总能量？）

3) 放电倍率

航电电池众多参数中最容易让爱好者产生疑惑的是“放电倍率”，也就电池外包装中常见的30C、20C这类参数，它们的含义是：该电池的“放电倍率”为30，20。放电倍率是什么意思？首先请读者区分该参数与上文中提到的电量单位：库伦，虽然它们都用英文字母“C”来表示，但却完全不是一回事。我们用实际例子来说明，如一款航电电池产品的容量为 $1000\text{mA} \cdot \text{h}$ ，表明该电池电荷量可以在 1000mA 的放电电流下，持续放电1小时。当电池的放电倍率为30C时，意味着电池可以在无人机系统运行中以最大30A的电流进行放电，即可以短暂产生最高为： $30\text{A} = 30\text{C} \times 1000\text{mA} \cdot \text{h}$ 的电流。

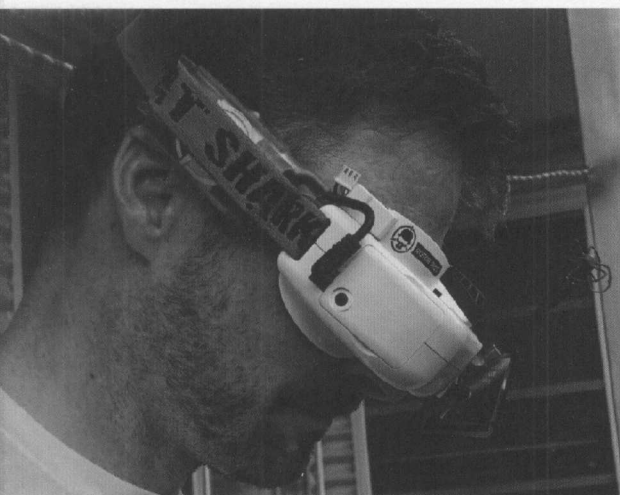


图 5.57 左图为 FPV 头戴设备；右图为正在执行任务的四旋翼无人机、不同应用中对放电倍率的要求存在差异
(图片来源: pixabay)

该参数表明了电池最大放电能力，换句话说，该参数描述了电池最大放电的性能。因此该参数在暴力飞行中非常关键，正如前文提到的无人机竞速飞行任务，在快速转弯时要求无人机快速变化姿态，与此对应要在很短时间内产生较大力矩，因此必须在极短时间内向无刷电动机输送大电流，在该应用情况下系统对电源的高放电倍率参数有特殊需求。读者需要体会放电倍率这个参数与无人机控制效果之间的联系，并能掌握在不同应用环境下针对电池放电倍率参数进行选择的方法。

综上，通过多旋翼无人机航电电池的四个主要参数，可以完成如下工作：

- a. 根据电池连接方式估算电池标称电压；
- b. 通过电池容量和标称电压估算电池总能量；
- c. 根据无人机系统对应的任务要求选择具备合适放电倍率的航电电池。

2. 电池充电与保养、安全

对于任何无人机系统而言，能量单元都是系统中的重要成本来源。(请思考问题：在你使用过或者见过的无人机系统中，成本主要来自哪些方面?) 尤其在一些行业应用中，要通过多台无人机协同，长时间不间断交互作业才能保证任务高效完成，因此要预备大量的电池组。而一般航电电池的充放电次数是有一定限制的，如果能够通过正确使用、充电、保养等方式来对电池进行最大限度的维护就在很大程度上降低系统成本。本书提醒读者注意那些需要持续付出努力并且看上去略为死板的工作，判断无人机从业者对机器熟悉程度的重要方法之一就是看他是否注意系统的日常维护，尤其是针对电池的维护与保养。越是经验丰富的无

人机从业者越能深刻体会无人机系统尤其是能量单元保养所能带来的价值。我们需要在意识上把能量单元对于无人机系统的影响从飞行过程中延续到飞行任务以外。

1) 充电器选择



图 5.58 小型无人机航电电池对充电器的功能要求是比较固定的

无人机航电电池充电要用到专门的电池充电器，对于电池充电器而言，牌子很多，原理上大同小异，但大家在选择充电器时还是要注意确认其能否满足我们在使用时的功能要求以及是否与已有电池匹配。前者很容易理解，比如当某些任务中需要对充电温度进行监控时，就需要购买具有温度传感器接口的充电器。至于电池匹配方面，一般充电器都会在产品表面或说明书中标注该充电器支持的电池种类与规格。如本书以 SKYRC 的 iMAX B6AC2（后文简称 IB2）为例，该充电器能够匹配 LiPo（Lithium-Polymer Battery，锂聚合物电池），但要求充电电池的串联电芯在 1~6 个范围内，而对于其他类型的电池与匹配也有专门的标注，大家在购买时需要留意这些细节。

2) 充电器接口

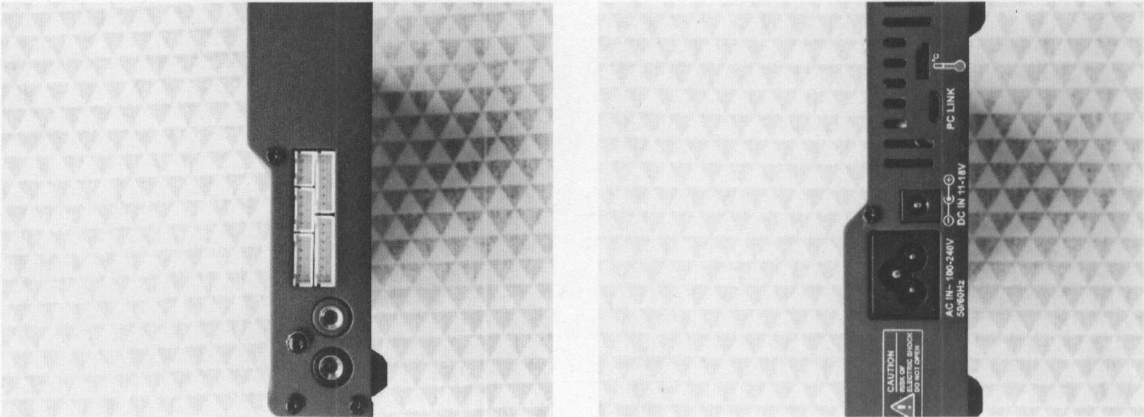


图 5.59 充电器两侧接口

IB2 左右两面共有 6 组接口，其中左侧共 4 组接口。从左至右依次是交流电源输入端：电压区间为 100V ~ 240V，频率区间为 50Hz ~ 60Hz；直流电源输入端：电压区间为 11V ~ 18V；电脑或 WIFI 模块接口；温度传感器接口。右边两组接口，从左至右分别为电源输出充电端、平衡充接口。

3) 电池接口类型

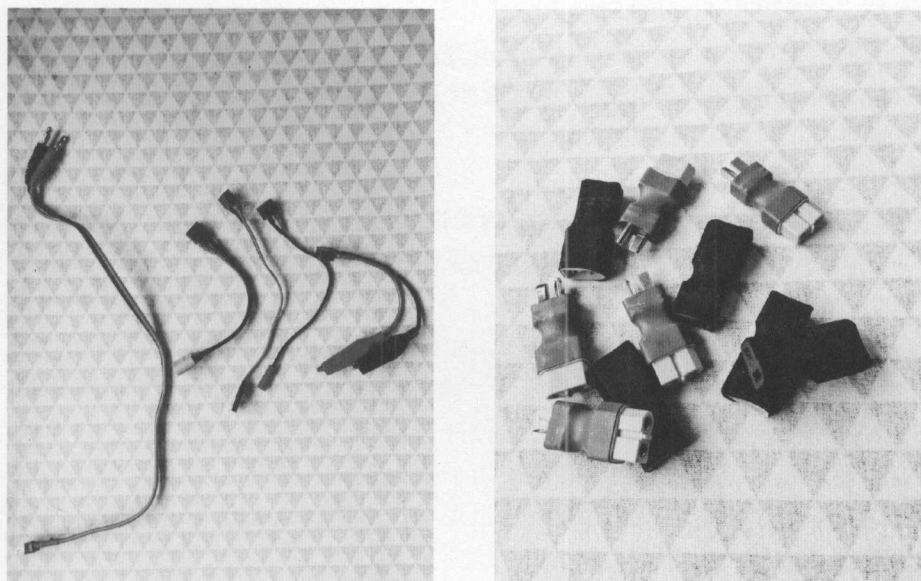


图 5.60 各类型接口及 XT60-T 型接口转换插头

国内的电池电源线常见接口种类为：XT60 接口和 T 型接口。大家在充电或无人机搭建时要注意电池电源线与充电器电源输出线以及机身分电板电源接口的匹配。如果已采购的产品接线不匹配只要额外购买对应接头进行焊接或者采购转换插头即可。

4) 充电接线



图 5.61 平衡充接线

在大多数电池充电过程中只需要关注三个接口：电源输入接口、电源输出接口、平衡充电接口。连接电源输入接口时，要清楚地了解所在国家或者所使用的外部电源对应参数，由于正负极连接线颜色区分明显，一般不会出现连接错误：红色配红色，黑色配黑色，蓄电池注意正负极。但在电池连接时还要注意选择与电池接口对应的类型。充电器产品除了电源输出线外一般会附送三类接头，因此一共有四类接口用来匹配不同种类的电池，如 XT60、T 头、蓄电池充电夹、遥控器电池充电插针。

读者在为航电电池充电时一定要使用平衡充。电池的平衡充接线要与充电器对应接口连接，整个过程非常简单，IB2 充电器已经在接口上侧标注了各个接口对应的航电电池电芯数目，并且不同数目的接口是无法连接的。

5) 充电模式选择

IB2 充电器上只有四个按键，它们对应的功能从左至右依次为：停止/电池种类选择；上一栏；下一栏；确认键。当我们将充电器与待充电电池连接完毕后，接通外部输入电源后充电器屏幕就会亮起来。

首先根据电池种类选择对应的充电程序，比如图 5.62 的示例中是对 LiPo 电池进行充电，就用上下选择键调整到对应 LiPo 的充电程序，按下“确认”键即可进入充电界面。

随后进入充电模式选择界面，一共有 5 种待选模式：充电、平衡充电、快速充电、储电模式、放电模式。读者在充电过程中必须使用平衡充模式，通过平衡充模式可以使电池的多个电芯在充电后基本保证电压一致，而不会出现某个电芯过放的情况，放电与储电模式都涉及电池的保养。



图 5.62 停留在选择功能“program”界面，点击“确认”后将进入设置界面

在选择充电模式之后按下“确定”键，就会进入具体的充电参数调整界面，这里要调整的参数包括充电电流大小与电池芯数（充电器会自动调整电池电压）。相信每位无人机使用者都希望自己的电池可以实现快速充电，毕竟无人机是属于蓝天的，电池和充电器在功能上完全支持快速充电与放电，前文中提到的电池放电倍数可以应用在这种情况下。但是建议大家在充电时不要让充电电流超过 1C，举例来说，示例图片中的电池电量为 5200mA · h，1C 的充电电流就是 0.52A，因此对这个电池充电时充电电流应当小于 0.52A。充电器的说明书一般会注明各种类电池的建议最大允许充电电流值。

电池芯数的选择一般不会出错，但无人机除了机载电池外还有遥控器电池也同样需要充电，因此读者在充电过程中要留心不同种类电池芯数的差别，不要在更换充电电池时忘记调

整电池芯数值。

在一切参数都确定后，长按“确认”键，就正式开始充电了。其中并没有什么难以理解之处，读者只要结合本节内容，再操作一次就会驾轻就熟了。

6) 电池保养

无人机的飞行情况与电池的状态关系很大，好比一个人无论再怎么聪明，再怎么有想法，身体素质很差，坐一会就腰酸背痛难以集中注意力，工作情况也不会好到哪里去。对于无人机而言，再好的飞控，精度再高的传感器模块，再好的数据融合算法，再友好的飞行环境，如果配上了一组不注意保养，状态很差的航电电池，也很难达到期望的飞行效果。

电池的日常保养需要贯穿无人机飞行前、飞行中、飞行后的整个流程。

无人机飞行前

该时间段对应电池的充电过程。充电中需要注意的内容已经在前面写得比较详细，这里总结一下要点：采用平衡充功能，充电电流不要过大过 1C。

无人机飞行中

表 5.1 电池类型、电池动作数值查询表

	LiPo	Lilon	LiFe	NiCd	MiMH	Pb
标称电压	3.7V/cell	3.6V/cell	3.3V/cell	1.2V/cell	1.2V/cell	2.0V/cell
最大充电电压	4.2V/cell	4.1V/cell	3.6V/cell	1.5V/cell	1.5V/cell	2.46V/cell
储藏电压	3.8V/cell	3.7V/cell	3.3V/cell	n/a	n/a	n/a
允许的快充放电倍率	51C	51C	54C	1C-2C	1C-2C	50.4C
最小放电电压	3.0-3.3V/cell	2.9-3.2V/cell	2.6-2.9V/cell	0.1-1.1V/cell	0.1-1.1V/cell	1.8V/cell

在无人机飞行过程中，操作者肯定希望能够尽量延长无人机的续航时间，因此有些爱好者喜欢把电池的电量尽可能用完，但是航电电池的电压值是有上下限要求的，一旦超过上限或者低于下限都会给航电电池带来不良影响。以常用的 LiPo 电池为例，每个电芯的电压值上限约为 4.2V，下限约为 3.0V ~ 3.3V，因此在无人机飞行过程中飞手一旦看到电池电压接近下限电压值，就应该拉回无人机，尽快安全降落。飞手需要时刻关注电池电量，很多专业应用团队中往往需要一个人来专门监控电池电压值。如果读者并没有团队，只有自己一人操作无人机，还可以设定相应的飞控功能来保证电压安全，如将低电警报数值设置的大于电池电压下限，预留出足够的降落时间。

无人机飞行后

在无人机飞行后，电池如果要进行长期储藏，一样需要注意保养。充电器功能中会有“储电”的模式，如 LiPo 电池芯的标称电压值一般为 3.7V，储电功能会将电池芯的电压充到 3.8V 左右，在此电压下电池存放不会产生不良影响。因此经常检查电池电压，保持电压值在标称值附近应当成为一个无人机爱好者或从业人员的良好习惯。

7) 电池安全

以航电电池为例，在使用前需要注意充电接线正负极不要接错。前文提到过，现在的充电器和电池都会按照红色为正，黑色为负的规格进行提示，这些方面问题不大，但是无人机工程师或者使用者往往在给蓄电池充电时会使用带夹头的充电线，如果是自己携带的夹头线，则可能由于长时间使用造成颜色不易辨识，很有可能因此导致电池短接，这对于任何种类的电池而言都是非常危险的情况。

在无人机进行外场测试或执行任务时，往往需要通过车辆携带众多设备，并且由于放飞

场地一般都在远离市区的偏远地区，车辆行驶路况往往不太理想，很容易遇到颠簸不平或急转弯等情况，如果安全意识较低或在设备放置时不太注意，将电池与其他危险物品堆放在一起，就有可能在运输过程中造成事故。因此在外场试验中，合理的设备安置是工程人员必须重视的问题。

在无人机飞行前要检查电池电压，并配合飞行的外部环境结合电池情况进行任务规划。比如当外部气温较低时电池很有可能无法充分放电，因此传感器传回电压即使还在 50% 以上，后面的飞行也可能面临快速掉电，如果操作团队没有提前为这类的情况进行备案，就有可能因为突然掉电导致返航时间不够，造成炸机事故。

在飞行任务结束后，除了定期的电池保养外，电池应当存储在安全袋中或者放置在阴凉干燥的环境里，避免高温、高湿环境对电池造成损坏或引发事故。

良好的安全习惯与规范的操作，详细的预案是无人机从业人员素质的集中体现。如果在这些关乎设备安全，团队安全，项目安全的事情上不注意或者觉得无所谓，那么在未来的研究项目中也实在是难堪大任。世间万事往往以小见大，各位读者一定不要马虎大意。

5.10 设计举例

在本节中，城堡将以一个简单的小型多旋翼无人机系统设计为例，介绍如何在系统设计中使用的相应公式和硬件知识。

1. 旋翼与电动机选择

对于四旋翼无人机而言，升力和姿态变化都靠旋翼的旋转提供，这意味着旋翼不止需要提供悬停时与重力平衡的拉力，还必须能够为飞行或机动提供足够动力。除此之外在很多实际任务中，一款无人机系统在设计之初就需要考虑有效负载的扩展能力，因此功重比或者拉重比是进行旋翼与电动机选择时首先要确定的参数，功重比的表达式如下：

$$\lambda = \frac{L}{G}, \quad (5.4)$$

其中 L 为无人机系统应当提供的总升力， G 表示无人机起飞重量上限， λ 是一个无量纲的比值常数。功重比的大小表示了无人机升力与重力之间的比值关系， λ 越大表示无人机动动力部分相对于系统重量而言能够提升的总升力越大，读者可以直接将功重比看做用无人机整体负载重量对无人机升力进行度量的参数。

根据不同的设计要求，功重比的确定是比较灵活地。为了达到最优效果，在很多研究或工程实现中会对功重比进行反复的设计与验证，在实际工程中比较常见的功重比 $\lambda = 2$ ，表示无人机旋翼系统能够提供约为整个系统自重两倍的升力值。

对于四旋翼无人机而言，易得每个电动机的升力值为：

$$f_{\max i} = \frac{L}{4}, \quad (5.5)$$

其中 $f_{\max i}$ 为第 i 个旋翼所应产生的最大升力， $i = 1, 2, 3, 4$ 。通过 (5.4) (5.5) 我们可以计算出每个旋翼的具体拉力值，结合前面的公式：(5.2)，(5.3) 我们就可以得到需要的电动机转速。但这里需要注意的是，无人机系统在大多数情况下拉力不会达到最大值，尤其对于航拍或其他常处于悬停、匀速飞行等状态的任务而言。在更多情况下，旋翼提供的拉力应与重力相同，即： $F = G = 0.5L$ 。所以在旋翼的选择中，应当根据厂商提供的表格，选择拉力值与重力相同时实现最高效率。

整个动力部分的效率要看做一个整体，因此当求得无人机旋翼需要的最大拉力值和常用

拉力值后还要结合电动机进行选择。此时有两种途径获取设计所需要的详细参数：①读者可以自制拉力试验台，进行电动机、旋翼的组合测试，通过测试结果进行选择。②可以通过查询拉力数据表进行型号选择。城堡建议独立研发人或小型团队选择后者，一方面厂家提供的相关数据可以实现对多数设计要求的覆盖，从效果来说无需读者自行测试。另一方面，组装试验台并进行测试，对于个人而言在数据出错率与实验成本上都比较高。但对于大型团队或者有实力与野心的公司而言，建立自己的测试环境并进行数据积累是很有必要的。

表 5.2 朗宇电动机 X2216 拉力数据表（图表来源：rcsunnysky.com）

螺旋桨尺寸 (英寸)	电压 (伏特)	电流 (安培)	升力 (克力)	功率 (瓦)	力效值 (克/瓦)	全油门负载温度 Load temperature in 100% throttle
APC1047	11.1	0.8	100	8.88	1.26126126	57°
		1.9	200	21.09	9.483167378	
		3.1	300	34.41	8.718395815	
		4.6	400	51.06	7.833920877	
		6.2	500	68.82	7.265329846	
		8.3	600	92.13	6.512536633	
		10.2	700	113.22	6.182653241	
		12.8	800	142.08	5.630630631	
		14.7	900	163.17	5.515719801	
		17.8	1000	197.58	5.061241016	
		21.9	1180	243.09	4.854169238	
APC8060	14.8	1	100	14.8	6.756756757	56°
		2.3	200	34.04	5.875440658	
		3.9	300	57.72	5.197505198	
		5.6	400	82.88	4.826254826	
		7.6	500	112.48	4.445234708	
		9.8	600	145.04	4.136789851	
		12.1	700	179.08	3.908867545	
		14.8	800	219.04	3.65230095	
		18.1	900	267.88	3.359713304	
		20.5	1010	303.4	3.328938695	

市面上的成品旋翼或电动机产品所需要的拉力数据表由电动机厂家直接提供，大家可以登录电动机厂家的官方网站或者相关论坛自行下载。电动机厂家会根据电动机型号针对不同尺寸的旋翼进行测试，并将测试结果形成表格，以便买家获取足够的信息。在拉力数据表中常见的数据类型包括：电动机型号、螺旋桨尺寸、电压、电流、油门开度、拉力（推力）、转速、功率、力效等。

电动机型号：详细内容可见 5.5 节，一般包含电动机尺寸数据，KV 值等参数。

螺旋桨尺寸：包括长度和扭矩系数。对于螺旋桨，结合公式 (5.2) 可以粗略认为，较大尺寸的螺旋桨在相同转速下提供的升力更大。然而带动更大的螺旋桨旋转意味着电动机需要克服的扭矩更大，对应电动机的电压值也会更高些，因此仅仅通过增加旋翼尺寸来提升旋翼升力的想法是不全面的。

电压值：无刷电动机可以工作在不同的电压值下，这取决于电调的输出电压。我们可以通过电压值结合无人机的 KV 值获取无人机的转速 $r \approx U * KV \text{ (rpm)}$ ，转速高低将影响旋翼升

力以及电动机效率。

电流：当电动机电压值不同时，流过电动机的电流值也会不同，该数据是电调选择的重要参考。

油门开度：该数据可以直观地理解为遥控器油门输入数据，是进行旋翼、电动机配对的重要参数。当得到每个旋翼的单独升力之后，尽量使常用拉力在 50% 左右的油门开度范围内，可以保证 2 : 1 的力效比。

拉力：该数据是对应型号的电动机和螺旋桨，在给定电压（转速确定）与指定油门开度下的数据值。

转速：该数据是由电动机 KV 值和电动机电压共同决定的，当电压过高时，转速也会提高，这对于电动机而言，意味着相同尺寸数据下的螺旋桨会产生更大的扭矩，会对力效值产生影响。

功率：通过该数值可以得到电动机与旋翼系统构成的动力部分电能消耗速度。对于多旋翼无人机而言，动力系统是主要的电力消耗环节，因此根据该参数结合无人机悬停状态下的飞行时间可以大致确定无人机系统需要的能量单元规格，所以该数据对于能量单元（对于小型多旋翼无人机而言即航电电池）选型非常关键。

力效（效率）值：该数值与力效比不同，力效比的本质是通过无人机自重来衡量无人机升力大小，因此力效比本身是一个无量纲常数。但力效值则描述了动力系统单位功率下产生的推力值，单位： kg (g) / W ，该数值越高，表明相同能量消耗速率下动力部分产生的升力值越高。从本质上来说，该数值是用升力来描述对应系统的能量利用效率。在进行旋翼与电动机选择时，应当使旋翼的常用拉力数值对应尽量高的力效值。

城堡在这里将多旋翼无人机螺旋桨与电动机的设计，选择流程简要总结如下：

- a. 根据整机重量及功效比计算每个旋翼的最大升力与常用升力；
- b. 根据价格质量选择备选电动机，获取电动机拉力数据表；
- c. 结合 50% 左右的油门开度选择满足常用升力中力效值最高的电动机和螺旋桨；
- d. 记录下该种选择中的功率值、电压值、电流值，以备后续硬件设计参考之用。

需要强调的是，上面这些参数是拉力数据表中最为常见的类型，掌握它们的本质，理解它们描述的核心是我们真正需要关注的重点。而简单背下这些参数的解释是没有太大意义的，我们需要思考实际的工程项目，来建立自己对无人机系统的“描绘”。在未来可能预见的工作中，也许很多参数没有被包含在常见参数表中，比如温度、湿度等，而这些参数在某些特殊任务中是不能被忽视的。

2. 电调选择

多旋翼无人机的动力部分包括：螺旋桨、电动机、电调。虽然元件不多，却是构成整个无人机系统“成本”（经济、能耗）的重要部分。好的设计是在满足设计要求的前提下性价比最高的方案。对于电调而言，在选择中最重要的参数是前文提到的螺旋桨和电动机设计过程中获取的电流数据。多旋翼无人机每对电动机、旋翼的组合都要通过电调输送驱动电流，四旋翼无人机需要四个电调，电调本身所消耗的电能并不高，但是要流过支持电动机运转的电流，因此电调的一个重要参数为允许通过的最大电流值。当确认螺旋桨和电动机选择后，就可以根据相匹配的电流数值选择电调，这样的先后顺序是合理的。然而，在选择中要注意的是，不能让电调的最大电流值与拉力数据表中的最大电流直接相等，而是要选择允许最大电流值比电动机、旋翼组合最大电流值高约 20% ~ 40% 的电调。如果选择两个电流值相同，则有可能让电调长期处于最大电流值的工作状态，这会影响电调寿命，持续的电调过热也会给无人机的其他组成部分带来风险，更何况根据电池的放电倍率，电流可能在短时的变化中超过该最大电流值，从而在飞行中直接烧坏电调。

3. 能量单元

能量单元的设计要根据无人机系统的具体要求进行,这涉及具体任务和机型选择,对于小型多旋翼无人机而言,一般采用航电电池作为能量单元,本节主要针对这一种情况,但在设计过程中需要考虑的重要节点是具有普遍性的。

在多旋翼无人机的航电电池选择中需要关注的参数主要来自于三方面,第一是耗能单元的基本数据,第二是续航时间,第三是航电电池本身的参数与性能。

多旋翼无人机动力部分的螺旋桨和电动机是主要耗能单元,根据无人机是否搭载有效负载,动力部分占整个系统能耗的比例范围约在 50% ~ 90%。在前面螺旋桨和电动机的选择部分可以得到动力系统的功率值,并可以据此大致推算出整个系统的功率,结合续航时间要求就可以推算出整个系统在执行任务过程中所需要的总能量。

如何根据总能量选择航电电池型号?只需要确认如下两个参数:电池电压和电池放电倍率。动力系统能够承受的最大电流为拉力数据表中最大电流的四倍,因此电池容量乘以放电倍率应当与该数值匹配。在 5.9 节中,放电倍率的选择需要与无人机应用环境适应,对于长时间稳定飞行的四旋翼系统应当选择低放电倍率,高容量的电池组。但对无人机机动飞行要求较高的应用场合需要考虑较高的放电倍率。

举例,为某任务设计一款总重 4kg,悬停续航时间为 20min 的四旋翼无人机系统。可知每个旋翼在悬停时需提供升力 1000gf。结合旋翼尺寸与力效值确定电机后,假设该升力下电机功率为 200W,则动力部分总功率为 800W,考虑 20% 的能量余度,电池系统应能提供约 $(800/3) / 0.8 \text{ W} \cdot \text{h}$ 的总能量。

通过无人机系统的总能量 W 和航电电池容量 Q ,就可以用下面的公式求出航电电池电压:

$$W = UQ, \quad (5.6)$$

小型多旋翼系统能量单元的选择流程及方法可以简要总结如下:

- a. 根据飞行任务确定放电倍率;
- b. 根据动力系统最大电流确定电池最高放电电流值;
- c. 计算单位放电倍率下的电流值,该值乘以时间(小时)即为电池容量;
- d. 根据无人机系统续航要求计算总能量;
- e. 根据总能量与电池容量计算电池电压。

第六章

深入无人机系统

在美国的第一任房东是一位很难给人留下好印象的女士。事实上那并不是她的房子，她只能算是二房东，她将一间房租给我和另外一个从俄罗斯来的国际交流生，每人一星期的租金为 100 美元。

我还清楚地记得第一次看房的过程，阳光明媚的下午，几只猫在门口懒洋洋地趴着，打开落地门进到客厅，迎面而来一阵酸涩的猫科动物特有的味道。参观两室一厅的屋子花不了几分钟，但耳朵里已经堆满了各类要求，其中有些要求被严格执行了“你是不能碰温度调节器的，我不能忍受现在设定值以外的任何温度”“早上是我洗澡的时间，那时厕所不允许使用”“虽然租给了你们房间，但整个屋子都是我猫咪的活动范围”等，还有些约定日后并没有兑现，如“你可以随便吃我冰箱里的零食，我会保证里面有充足的事物”，另外一些被告知的约定与事实严重不符“我在房间里准备了干净的褥子和毯子”，此外还有一些情况她并没有在看房时提前通知，如三天两头在客厅里留宿的陌生男子，以及必然会持续到半夜的各种派对等，当然这都是看房之后发生的事情。还记得我拿出第一个星期的租金时她两眼放光的样子，“我有 100 美元啦，我有 100 美元啦”她又蹦又跳的高喊着不知跑到了哪里去，把我一个人晾在了空荡荡的客厅里。“Rosy，虽然是个好名字……”，我把这份记忆迅速归档到“人如其名”的人生经验里。臃肿、自私、贪婪、浅薄……如果还有其他负面标签我也可以毫不犹豫地贴在她身上。

在之后的交流生活中，我交到了一些当地朋友。一次，我被邀请到一位朋友家里晚餐，吃饭时她突然说起来：“刚才去接你时，那片街区勾起了我一些年少时的回忆。”“哦？人还是事呢？”“我有一位朋友，已经很多年不联系了，她以前就住在那一片区域中，她的父亲与我父亲是同事，小时候有段时间，我们经常在一起。”谁年少时没有好友在日后分别呢？我对这个话题并不太感兴趣，但她似乎沉浸在自己的回忆中，自顾自地说着：“当时在一次偷渡事故中，只有她和另外几名孩子幸存下来，但他们的父母却都已遇难。我父亲的那位朋友就把那些小孩都收养了，当时算是一个大新闻，好像还上了报纸，但你知道的，收养那么多孩子……是很难照顾好的，因此他们很小时就不得不自己打拼了，成年后就完全和养父母脱去了联系。所以我也很久没有见到她，她叫什么来着……Rosy”

当天晚饭后的事情已经被时间冲刷的所剩无几，只是羞愧和自责的感觉与这份回忆一同被压缩在脑海中，沉甸甸的，直到如今。

认识一个人与认识无人机有着很多相似的地方。我们可以通过外貌、穿着、口音、动作、履历表来建立对一个人的认识，这些我们看得见，摸得到的东西都很真实。但如果认为这些表面的信息完全等同于一个人深层的真实情况就显得很幼稚了。

同样地，我们可以通过无人机的历史发展，无人机的机型，无人机的硬件结构来认识无人机，这些内容无论是历史记录还是现实的产品、元件都可以为我们提供了解无人机所需要

的直接素材。然而当我们期望能够深入理解无人机系统时，这些素材就会显得很全面。

本章将围绕下面几个问题来建立对无人机系统更深层次的理解：

- a. 如何完成无人机所需要数据的转换？
- b. 如何实现无人机系统中内外状态的反馈？
- c. 如何建立并使用无人机系统的数学模型
- d. 如何理解无人机系统自动控制的实现？

6.1 玩转坐标系

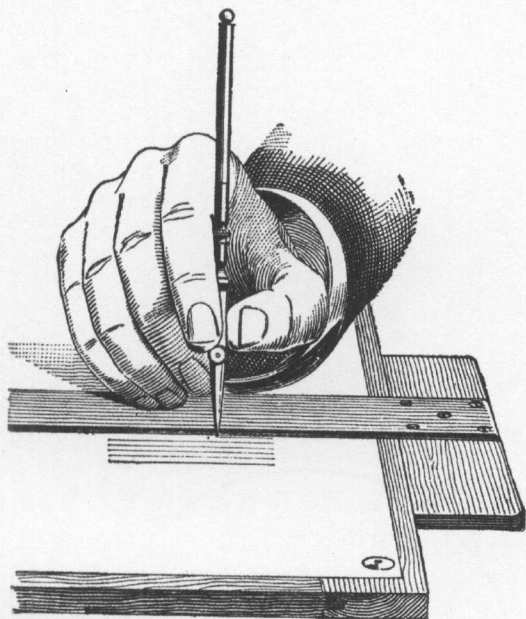


图 6.1 坐标系或其背后的概念广泛存在于从测量到导航的各类工程、研究与生活应用中（图片来源：维基百科）

相信无论哪个年龄段的读者都曾在自己的学习、研究、实践中使用过各种各样的坐标系。然而在这个世界中我们似乎看不到任何坐标系的存在，隔壁物理学院的朋友们就算没有坐标系也可以把物理定律刷刷地写出来。问题来了：为什么需要坐标系呢？在回答这个问题前，先看一个简单的任务：“向北走五米”，城堡相信每个读者都可以轻松完成这个要求，虽然不会有人看到一个如教科书一般画下来的坐标系，但“坐标系”这个概念却真实的被应用在其中。我们建立了一个指向正北的坐标轴，并在坐标轴上以“米”为单位，运动了五个单位。有时，看不见的东西在这个世界中存在的范围可以把我们吓一跳。

“方向”和“度量”可以帮助我们通俗地理解坐标系。对于一个系统，我们往往最关注它的变化情况，即运动方向和大小，而坐标系就是我们定量描述所需要的基本工具。（请思考问题：我们能够脱离坐标系来描述一个运动么？）

相信读者已经能够体会到坐标系的重要性了，本节的内容就是介绍描述无人机的常用坐标系。

无人机系统中常见的坐标系包括：地球中心坐标系（Earth Centered Earth Fixed Coordinate System），当地水平坐标系（North-East-Down Coordinate System），WGS-84 大地坐标系（World Geodetic Coordinate System 1984），机体坐标系（Body Frame），机体水平坐标系（Vehicle-carried NED Coordinate System）。

1. 右手法则

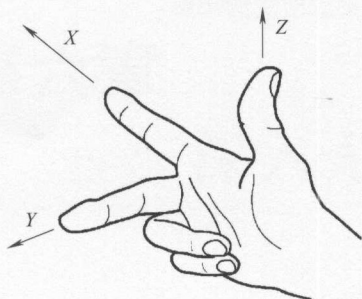


图 6.2 右手定则，拇指的方向可以指向上方也可以指向下方

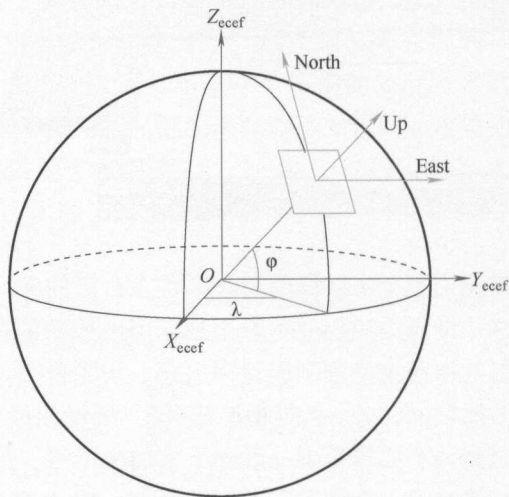
右手坐标系即符合“右手法则”的坐标系。这个法则或者类似法则读者会经常见到，它们的作用是为了以最简单且统一方式确定坐标轴及正方向。

如图 6.2，右手大拇指，食指，中指呈“痉挛”状，其中任意两个手指与已确定的两个坐标轴及其正方向重合，第三个手指及指向就是剩下那个坐标轴和其正方向。

然而在实际的飞行器系统分析时往往会采用“倒置”的右手定则，此时手掌向下，中指指向下，描述了 Z 轴及其正方向。由于重力加速度方向向下，因此倒置的右手坐标系在实际飞行系统中可以更加方便使用。

2. 地球中心坐标系 (ECEF)

图 6.3 从图中可以看出 ECEF 坐标系与 EUN (East-Up-North) 坐标系的区别，前者是相对于地球，后者则是具体对象所在的“平面”。古人对地球形成的“平面感”其实是 EUN 坐标系存在的直观表现 (图片来源：维基百科)



该坐标系与地球固联，且随着地球一起转动。图中 O 即为坐标原点，位置在地球质心。 X 轴通过 Greenwich (格林尼治) 线和赤道线的交点，正方向为原点指向交点方向。 Z 轴通过原点指向北极。 Y 轴与 X , Z 轴构成右手坐标系。

3. WGS-84 坐标系

GPS 输出的位置数据就是这个坐标系下的数据。

上面这句话复杂一点解释就是：GPS 单点定位的坐标以及相对定位中解算的基线向量属于 WGS-84 大地坐标系。

X 轴指向 BIH (国际时间服务机构) 1984.0 定义的零子午面 (Greenwich) 和协议地球极 (CTP) 赤道的交点。 Z 轴指向 CTP 方向。 Y 轴与 X , Z 轴构成右手坐标系

什么“BIH1984.0”，很麻烦有没有？一句话理解：把 ECEF 用在 GPS 中就是 WGS-84 坐标系。

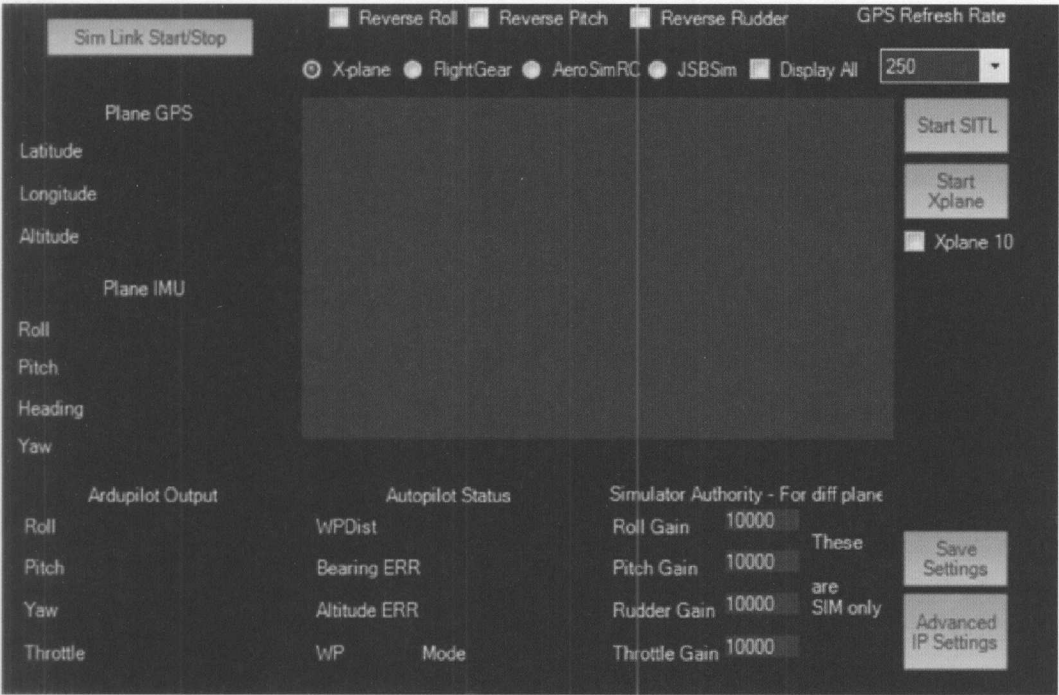


图 6.4 3DR mission planner 无人机地面控制站中 GPS 数据部分截图

图 6.4 中大家很容易看出 GPS 输出的常见定位数据：经度（Longitude），纬度（Latitude），海拔（altitude）。前面章节中提到过这样一个问题：为什么有了 GPS 输出的海拔高度，我们还是要用气压计或其他硬件辅助定高呢？为什么 GPS 的海拔数据精度没有办法支撑无人机高度定位呢？

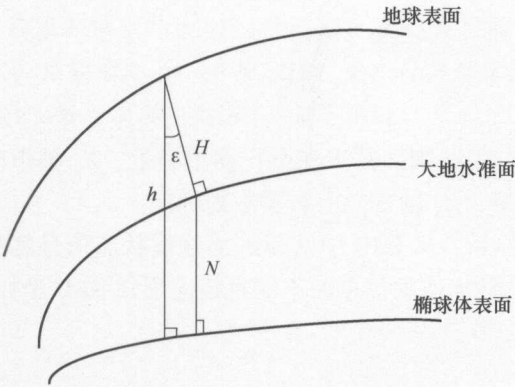
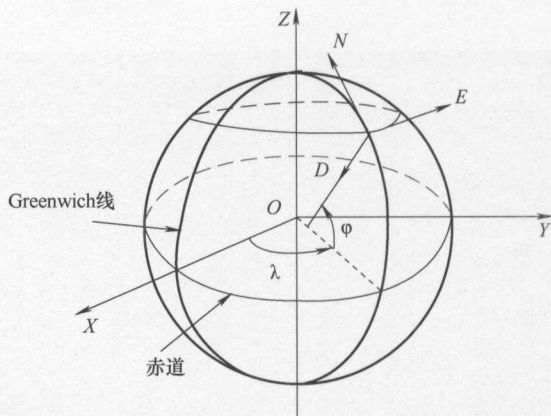


图 6.5 地球表面、大地水准面、椭球体表面并不是同一概念，它们在某个层面上体现出了科学中普遍性与具体情况，人之标准与实际情况间的误差（图片来源：参考文献 [3]）

答案就在数据的名称上：“海拔”。因为 GPS 输出的信息是相对于 WGS-84 坐标系，我们可以把它看作一个参考椭球体，GPS 输出的高度是垂直于椭球表面的高度，不是相对于海平面（Mean Sea Level）的高度。图 6.5 中 h 是 GPS 测得的相对于椭球表面的高度； H 表示正高； N 表示大地水准偏差，它随着地球重力分布变化，因此很难确定具体数值。

4. NED 坐标系

图 6.6 ECEF 坐标系与 NED 坐标系 (图片来源: 参考文献 [3])



NED 坐标系与前面提到 EUN 坐标系的区别在于“指下”和“指上”，在无人机系统中更常用 NED 坐标系，因为重力方向垂直向下。NED 坐标系是在导航计算时使用的坐标系，向量分别指向北、东、地，因此 NED 坐标系也经常称为“北东地坐标系”。

我们有了经纬度为什么还需要 NED 坐标系呢？GPS 可以获得在 WGS-84 中的速度向量，为了方便使用速度向量进行无人机控制，我们要把它转换在无人机所在位置的“平面坐标系”下——Local NED。

5. 机体坐标系

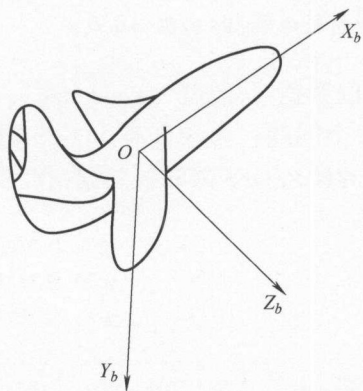


图 6.7 机体坐标系就像“粘”在无人机质心上一样 (图片来源: 参考文献 [3])

机体坐标系与飞行器固联，坐标系符合右手法则，原点在飞行器重心处， X_b 轴指向飞行器机头前进方向， Y_b 轴由原点指向飞行器右侧， Z_b 轴方向由右手法则确定。

机体坐标系是无人机惯性导航的基础坐标系，从 IMU 中获得的加速度状态信息就是机体坐标系下的数值。当我们获取 IMU 输出的 X_b 轴加速度信息时不能直接应用在 NED 坐标系下。

6.2 坐标系间的数据转换

不同坐标系的作用不同，如无人机导航是在 NED 坐标系中实现，但 GPS 数据却是基于 WGS-84 坐标系（请在读完本节后思考问题：这些坐标系在数据转换中起到了怎样的作用？），同时无人机的姿态控制是在机体坐标系下完成的。因此不同坐标系间的数据转换显得尤为重要。

其实坐标系间的数据转换就是基变换，大家可以与前文的内容对照理解基变换在无人机

系统中的实际使用过程。

本节将以 GPS 数据为例，从实际系统的数据转换过程出发为大家呈现数据在无人机系统坐标系之间的变化方式。

1. GPS 输出数据详解

实际的 GPS 系统会以一定格式输出很多数据，如时间，精度因子，卫星编号，信噪比等，但对于无人机控制而言，最为重要，也是最常用的还是“经度 (Longitude)”，“纬度 (Latitude)”以及“高度 (height)”三组数据： $P_G = [\lambda, \varphi, h]^T$ 。通过 GPS 获取的飞行器的位置坐标基于 WGS-84 坐标系，简称 Geodetic 或 G 坐标系。



图 6.8 1972 年 7 月由阿波罗 17 号宇宙飞船拍摄的地球照片 (图片来源: 维基百科)

为什么需要单独建立一个坐标系呢？地球表面地势复杂，有山有海，高低不平，需要建立一个简单而精确的近似数学模型。研究人员和工程师们决定采用椭球体作为地球的近似，而 G 坐标系就描述了一个椭球体，给出该椭球体的基本参数：长半轴 a ，短半轴 b ，第一偏心率 e ，第二偏心率 e' ，扁率 f ，曲率半径 (米)：

$$\begin{aligned} a &= 6378137, \\ b &= a(1 - f), \quad f = \frac{1}{298.257223563} \\ e &= \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}, \\ e' &= \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{b^2}}, \end{aligned} \quad (6.1)$$

如上节所述，GPS 硬件直接获取的高度是相对于 G 坐标系中椭球表面的高度。而海拔是相对于海平面的高度，它与地球表面形状和重力分布相关。相对于大地水准面的高度才是海拔，也就是图中的 H 参数。详细描述可以通过下式获得：

$$h \approx H + N, \quad (6.2)$$

N (大地水准偏差) 作为 GPS 输出高度 h 和当地海拔之间的偏差，一般在正负 100m 以内。

由于 GPS 导航方式采用的坐标系不能直接获取无人机相对于地面的位置高度，而且这个误差范围是如此之大，所以无人机系统都需要根据实际的任务需求安装额外硬件以确保无人机高度状态信息的精确反馈。

2. 从 Geodetic 到 ECEF 坐标系的数据转换

通过 G 坐标系下的三个参数：经度、纬度、高度，可以获得飞行器在椭球表面的位置坐标。但进行导航计算时，我们需要把数据换算到 NED 坐标系下。要完成从 G 系到 NED 的数据转换还需要一个过渡过程：G 坐标系到 ECEF 坐标系下的数据转换。

$$P_E = [X_E, Y_E, Z_E]^T, \quad M = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad (6.3)$$

$$P_E = [X_E, Y_E, Z_E]^T = [(M + h) \cos \varphi \cos \lambda, (M + h) \cos \varphi \sin \lambda, [M(1 - e^2) + h] \sin \varphi]^T,$$

其中 M 是我们常说的曲率半径 (m)。通过上面的计算公式就可以实现从 G 坐标系到 ECEF 坐标的数据转换。

3. 从 ECEF 到 NED 坐标系的数据转换

对于商用无人机，相比于它在椭球中的信息，我们更关心它在平面中的位置向量和速度向量。将 NED 坐标系看作导航中最重要的坐标系并不为过，NED 坐标系也经常被直接称为导航坐标系 (NavigationCoordinate) 或者地面坐标系 (Ground Coordinate)。

首先要获取 NED 坐标系中的参考原点，一般也就是无人机 GPS 星数达到要求后的起始位置。这也是为什么无人机产品要在星数足够之后才能起飞。

下面给出参考原点的坐标信息及从 ECEF 到 NED 的转换计算：

$$\begin{aligned} P_{E,ref} &= [X_{E,ref}, Y_{E,ref}, Z_{E,ref}]^T, \\ P_{G,ref} &= [\lambda_{ref}, \varphi_{ref}, h_{ref}]^T, \\ P_N &= R_{N/E}(P_E - P_{E,ref}), \end{aligned} \quad (6.4)$$

从 ECEF 到 NED 坐标系的旋转矩阵如下：

$$R_{N/E} = \begin{bmatrix} -\sin \varphi_{ref} \cos \lambda_{ref} & -\sin \varphi_{ref} \sin \lambda_{ref} & \cos \varphi_{ref} \\ -\sin \lambda_{ref} & \cos \lambda_{ref} & 0 \\ -\cos \varphi_{ref} \cos \lambda_{ref} & -\cos \varphi_{ref} \sin \lambda_{ref} & -\sin \varphi_{ref} \end{bmatrix}. \quad (6.5)$$

结合上面两部分的计算方法，成功地实现了 GPS 输出的位置数据到 NED 坐标系下的转换。换句话说，我们获得了进行无人机控制器设计所必需的外环位置状态信息。

但外环信息一共有六个，还有三个速度状态呢？通过 GPS 可以获得 ECEF 坐标系下的速度向量。与 G 系类似，相比于飞行器在 ECEF 这个三维坐标系的速度向量，我们更关心相对于 NED 坐标系的速度向量：

$$\begin{bmatrix} V_N \\ V_E \\ V_D \end{bmatrix} = C(\lambda, \varphi) \begin{bmatrix} V_X \\ V_Y \\ V_Z \end{bmatrix}, \quad (6.6)$$

$$C(\lambda, \varphi) = \begin{bmatrix} -\sin \varphi \cos \lambda & -\sin \varphi \sin \lambda & \cos \varphi \\ -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ -\cos \varphi \cos \lambda & -\cos \varphi \sin \lambda & -\sin \varphi \end{bmatrix}. \quad (6.7)$$

我们还没有讨论从 NED 坐标系到机体坐标系的数据转换，为了描述无人机的旋转运动，我们需引入无人机姿态的概念。（请思考问题：为什么描述旋转运动需要额外引入状态？这

与哪些物理学定义有关系?)

6.3 无人机姿态

读者已经可以获得无人机的位置和速度信息,并且能够把这部分数据转换到 NED 坐标系下,这当然前进了一大步,但还不足以让我们全面了解无人机的运动情况。请看图 6.9:



图 6.9 倒立飞行的 Trex 250 (图片来源: 维基百科用户 Jblackmore)

当直升机型无人机进行 3D 飞行时,可以实现 180° 倒立。因此当我们拿到 NED 坐标系下的无人机位置和速度状态信息后,无人机依然可能有不同的运动状态,获取的外环状态信息已经不足以描述无人机详细的运动情况了,即该运动的解不唯一。读者需要一些额外信息才能够精确描述无人机的飞行状态,这正是本节将介绍的内容:无人机姿态。

与“姿态”对应的英文单词有两个“Attitude”或者“Orientation”,后者的意义更为明显即“指向”,常用于卫星姿态描述,在无人机领域比较习惯使用“Attitude”一词。(请思考问题:在工科、理科学学习过程中是否应该掌握对应的专业英语技能?)

多旋翼无人机的姿态可以通过机体坐标系和 NED 坐标系之间的关系来定义。在机型介绍中,大家已经了解了多旋翼无人机在实际操作中的姿态控制方式。很容易直观地理解多旋翼无人机具备六个自由度 (Degree of Freedom, DOF),沿机体坐标系三轴进行的线性运动以及绕机体坐标系三轴进行的旋转运动。自由度的定义是:确定一个质点的位置所需要的独立坐标的个数,读者也许会奇怪,三维坐标系中只有三个相互独立的坐标轴,怎么会有六个自由度呢?当引入旋转运动后,我们就不能把无人机看作一个质点,因为质点是无法旋转的,而

要将其看作一个刚体。在无人机中有 6 个自由度，意味着我们需要六组基坐标来描述它的完整位置，这六组基坐标就是无人机所在 R^3 空间中的三个坐标轴，以及围绕该三个坐标轴的姿态角，其中三个线性自由度的描述已经通过位置坐标和速度向量实现，还需要对三个旋转自由度进行描述。

1. 欧拉角

无人机围绕机体坐标系三轴的旋转运动可以表示为：绕 X_b 轴的横滚运动，绕 Y_b 轴的俯仰运动以及绕 Z_b 轴的偏航运动。欧拉角直观地将无人机的旋转姿态转化为机体坐标系和 NED 坐标系之间的夹角关系。

说到角度，我们把它限制在同一个平面内线和线的关系或者相交平面之间的关系。在无人机坐标系中，请大家建立起六个面的抽象图形，机体坐标系下三个平面： $X_bO_bZ_b$ ； $X_bO_bY_b$ ； $Y_bO_bZ_b$ 以及 NED 坐标系下三平面： $X_NO_NZ_N$ ； $X_NO_NY_N$ ； $Y_NO_NZ_N$ 。

当我们确立了六个平面之后，就可以描述无人机的旋转姿态了。我们将 $\angle (X_bO_bZ_b, X_NO_NY_N)$ 定义为横滚角： φ ，用来描述无人机的横滚运动；将 $\angle (X_bO_bY_b, X_NO_NY_N)$ 定义为俯仰角： θ ，以此描述无人机的俯仰运动；最后将 $\angle (Y_bO_bZ_b, Y_NO_NZ_N)$ 定义为偏航角： ψ ，以此描述无人机的偏航运动（航向）。

2. 方向余弦

实现从 NED 坐标系到机体坐标系的数据变换有什么意义呢？无人机的旋转运动相对于无人机自身是没有任何意义的，只有相对于地面才有意义。因此我们需要用坐标系间的相对变化描述旋转运动，具体到无人机系统就是 NED 坐标系和机体坐标系。但如何来描述坐标系间的旋转呢？（请思考问题：坐标系对应线性代数的哪些知识？线性代数中如何对同一向量在不同坐标系进行描述？）

读者可以联系线性代数中的基础知识——线性变换来理解。坐标系间的数据转换本质上就是同一向量在不同基下的描述，这些基彼此之间可以通过线性变换获得，而矩阵就是进行线性变换的专门工具。

可以把无人机任意一次旋转按次序拆分为三个部分：绕 Z_b 轴的偏航运动，绕 Y_b 轴的俯仰运动，绕 X_b 轴的横滚运动。每一次运动用一个旋转矩阵来描述就成了下面的形式：

$$\begin{aligned} R_Z(\psi) &= \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \\ R_Y(\theta) &= \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix}, \\ R_X(\varphi) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix}. \end{aligned} \tag{6.8}$$

请读者注意，这三个矩阵都是斜对称阵，喜欢数学的朋友可以自行思考，肯定可以挖掘出很多有趣的内容。此处需要读者记住的是斜对称阵的特征向量两两相互独立，且上面这三个斜对称阵中包含的正交向量都是单位向量。也正因为这样，我们可以通过这几个斜对称阵来进行基变换（ T_1 ）。

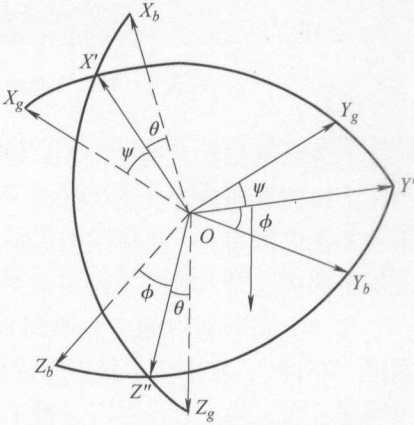


图 6.10 欧拉角描述旋转运动
(图片来源：参考文献 [3])

很容易得到从 NED 坐标系到机体坐标系的坐标变换矩阵（方向余弦矩阵）：

$$\begin{aligned}
 R_{B/N} &= R_X \cdot R_Y \cdot R_Z \\
 &= \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & \cos\theta\sin\psi & -\sin\theta \\ \sin\varphi\sin\theta\cos\psi - \cos\varphi\sin\psi & \sin\varphi\sin\theta\sin\psi + \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi\cos\theta \\ \cos\varphi\sin\theta\cos\psi + \sin\varphi\sin\psi & \cos\varphi\sin\theta\sin\psi - \sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix}, \quad (6.9)
 \end{aligned}$$

很容易证明正交矩阵的乘积依然是正交矩阵，因此 $R_{B/N}$ 同样是正交矩阵，这意味着从机体坐标系到 NED 坐标系是 T_1 的逆，对应是 $R_{B/N}$ 的逆矩阵，读者在这里一定会欣喜若狂，因为正交矩阵在计算中最优秀的品质就是它的逆等于转置，所以在任何硬件中都很容易求得这个逆变换： $R_{N/B} = R_{B/N}^{-1} = R_{B/N}^T$ 。

当我们有了这些旋转矩阵后能用它们做些什么？这个问题会在后面无人机控制的相关内容中进行讲解，但不妨在此处记下这样一个问题，以提醒我们当遇到任何一个理论、技术、知识时都要思考一下“它对我有什么意义？我该如何使用它？在实际系统中需要注意什么？”

3. 不唯一与奇异性

欧拉角是非常直接的姿态表示方式，但也存在两个问题：①不唯一；②奇异性。这两个问题直观上难以描述，但借助数学就可以清楚地进行解释。

不唯一性：举一个例子，令 $\theta_1 = 0$ ； $\theta_2 = 2\pi$ ，这时从 NED 到机体坐标系的转换矩阵为

$$R_{B/N} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\cos\varphi\sin\psi & \cos\varphi\cos\psi & \sin\varphi \\ \sin\varphi\sin\psi & -\sin\varphi\cos\psi & \cos\varphi \end{bmatrix}, \quad (6.10)$$

读者很容易看出，这种不唯一性是由三角函数的周期性引起的。

另外一个奇异性（局部）可以通过著名的“万向节锁死”现象来理解：如果我们令 $\varphi = \theta = \psi = \pi/2$ 。这会带来什么问题呢？在后面介绍无人机数学模型时，三个欧拉角与无人机本身的旋转角速度是通过一个矩阵进行关联的：

$$S = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi\tan\theta & \cos\phi\tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi\sec\theta & \cos\phi\sec\theta \end{bmatrix}, \quad (6.11)$$

此时 $\sec\theta = 1/\cos\theta = 1/0$ ，零出现在分母上，这时控制器就没有办法处理被控对象的数学模型了，也将因此无法实现控制量计算，这就是常说的“万向节锁死”。

正是上面所描述的奇异性使得欧拉角的姿态描述方式在某些情况下不可使用，这样的情况一旦出现会给无人机控制带来一定风险的。因此我们需要另外一种描述方法，可以对无人机所有的姿态进行描述。换句话说，我们需要一种全局的姿态描述方法。

4. 四元数

四元数是一种全局的姿态描述方法，在使用四元数进行姿态描述的时候，纵使出现上文中 $\phi = \theta = \psi = \pi/2$ 的情况，依然是有解的。由于无人机姿态中这种奇异性的情况非常特殊，我们通过直接验证理解四元数的全局性。首先需要获得姿态的四元数表示方程，我们已经有了欧拉角的姿态描述方法，不妨看一看如何从欧拉角获取四元数：

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi/2 * \cos\theta/2 * \cos\psi/2 + \sin\phi/2 * \sin\theta/2 * \sin\psi/2 \\ -\cos\phi/2 * \sin\theta/2 * \sin\psi/2 + \sin\phi/2 * \cos\theta/2 * \cos\psi/2 \\ \cos\phi/2 * \sin\theta/2 * \cos\psi/2 + \sin\phi/2 * \cos\theta/2 * \sin\psi/2 \\ \cos\phi/2 * \cos\theta/2 * \sin\psi/2 - \sin\phi/2 * \sin\theta/2 * \cos\psi/2 \end{bmatrix}. \quad (6.12)$$

其实四元数本质上也是一组相互正交的向量，如果要用它们来表示一个新的坐标系，还需要对它们进行归一化处理，使其长度为1：

$$\begin{aligned} \text{mag} &= \sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}, \\ q_i &= \bar{q}_i / \text{mag}, i=0,1,2,3, \end{aligned} \quad (6.13)$$

如此一来我们就可以通过欧拉角获取四元数了，其实它们从本质上还是一次坐标变换，只不过通过把空间维度提升1维的方式来满足全局性的需求。

易得从四元数到欧拉角的转换公式：

$$\begin{aligned} \phi &= \arctan2(2(q_2q_3 + q_0q_1), (1 - 2(q_1^2 + q_2^2))), \\ \theta &= -\arcsin(2(q_1q_3 - q_0q_2)), \\ \psi &= \arctan2(2(q_1q_2 + q_0q_3), (1 - 2(q_2^2 + q_3^2))). \end{aligned} \quad (6.14)$$

当再次出现90°的姿态角时，由于没有出现分母为零的情况，因此依然有解。

从欧拉角到四元数的程序实现非常直接，不需要像一般的控制算法那样进行离散化，因为这里的转换公式并不对应时域函数，而是直接对应变数值，所以只要我们通过传感器获得了可靠的姿态数据值后就可以直接带入公式，程序示例：

```
quat [0] =  chphi0 * chtheta0 * chpsi0 + shphi0 * shtheta0 * shpsi0;
quat [1] = -chphi0 * shtheta0 * shpsi0 + shphi0 * chtheta0 * chpsi0;
quat [2] =  chphi0 * shtheta0 * chpsi0 + shphi0 * chtheta0 * shpsi0;
quat [3] =  chphi0 * chtheta0 * shpsi0 - shphi0 * shtheta0 * chpsi0;
```

6.4 多旋翼无人机数学模型

人生中有些事情就是这样，你越是想要逃离它，它就追的越紧，直到你跑不动了，气喘吁吁地扭过头来看着它，它也停下来安静地看着你。有时能安静几个月，有时能安静几十年，直到你接受这样的事实：你摆脱不了它，一旦调头想要逃避，它就会追得更紧。既然如此不如面对面，来一场酣畅淋漓的战斗吧。有时你会赢下这场战斗，有时你们会不打不相识成为毕生的朋友，有时你会输掉这场战斗，不得不退到原点，另换一条路走。但无论如何你与它之间的纠葛一定会画上句号。

数学对于研究人员和工程师而言，即便不是最强的对手，也一定能被划入“最强之一”。抽象性、严谨性、普遍性……这些数学特有的性质实在是令人望而生畏，可一旦你认识它，使用它，了解它之后，这些看上去可怕的坚甲利刃又能瞬间成为你在研究和工程上最得力的工具。

本节将不会涉及任何数学定理或者特殊的计算方法，而是引入无人机数学模型的内容，希望读者在阅读本节时，脑海中时刻提醒自己下面的问题：在我的工作或项目中如何使用这些内容？

数学模型是深入研究无人机系统的基础，它至少可以在两方面为我们提供帮助：①数学模型能够将整个系统以精确量化的方式呈现在我们面前；②数学系统能够揭示出无人机系统中“肉眼”看不到的内在性质。

举例来说，多旋翼无人机定距桨旋转产生升力是实际系统的真实运动表现。任何一个工

工程师都清除，相同的桨叶，如果要想让升力大一些就要提高油门输入，也就间接提高了旋翼转速。但在转速相同的前提下，如果要想让升力增大就要加装更大尺寸的旋翼。这样的描述非常直观，在一定的程度上是完全可行的。然而当出现下面两类情况，前面的经验就无法满足需求：①严格的设计要求。在一些无人机系统设计或应用任务中会对系统提出非常严格的要求，比如要求无人机姿态变化的区间必须限制在明确的范围内，如果想凭着“手感”试出这样的系统并能稳定实现是不现实的；②严格的成本控制。成本的限制因素可能来自于整个项目的总成本要求，也可能是在某个环节，如验证阶段针对实验样机提出。这些任务的要求在本质上需要设计人员能够对无人机系统各部分及内部关系等进行量化描述，并根据明确的指标求出精确设计参数值。这样的要求与数学的精确性相吻合，因此数学模型是无人机系统精确设计的必备工具。

另一方面，数学模型能够深入呈现无人机系统的内在性质，从而让我们更好理解无人机的运动特点。比如无人机运动中常常出现的各种耦合对于研究人员和使用者而言都是令人头痛的情况，我们可以通过直接观察，从已发生的飞行过程中体会这些耦合特性的表现，但数学模型可以帮助我们深入理解这些耦合的起源与影响因素。以无人机俯仰运动中前飞和垂飞间的耦合为例，数学描述如下：

$$\begin{aligned}\dot{u} &= vr - wq - g\sin\theta + X_f/m, \\ \dot{w} &= uq - vq + g\cos\varphi\cos\theta + Z_f/m,\end{aligned}\quad (6.15)$$

其中 g 为无人机所在位置的重力加速度， X_f 、 Z_f 分别为机体坐标系上前飞和垂飞方向上所受的合外力。无人机前飞中的“掉高”现象可以通过垂向动态方程进行理解：俯仰角通过重力加速度的作用对垂向加速度施加影响，同时前飞速度与纵向角速度相乘对垂向加速度施加影响。由于无人机的姿态变化速率往往很高，所以这个乘积可以对垂向加速度造成很大影响。通过上面的分析可以看出，数学模型不但告诉了我们状态耦合的原因，涉及的参变量等信息，还可以帮助我们估计它的变化范围（请思考问题：“量化”两个字对我们意味着什么？）。

数学模型可以帮助我们掌握不同机型的控制与飞行原理。比如下面的微分方程：

$$\begin{aligned}\tau_m \dot{a} &= -a - \tau_m q + A_b b + A_{lat} \delta_{lat} + A_{lon} (\delta_{lon} + K_c c), \\ \tau_m \dot{b} &= -b - \tau_m p + B_a a + B_{lat} (\delta_{lat} + K_d d) + B_{lon} \delta_{lon},\end{aligned}\quad (6.16)$$

描述了直升机型无人机主旋翼的挥舞动态。其中 a 、 b 分别为无人机主旋翼的横纵挥舞角， τ_m 为挥舞运动的有效时间常数， A_b 、 B_a 为交叉耦合系数， A_{lat} 、 A_{lon} 、 B_{lat} 、 B_{lon} 表示从周期变距输入到主旋翼挥舞角的有效稳态增益， δ_{lon} 、 δ_{lat} 为周期变距输入。从上面的公式中能看出 δ_{lon} 、 δ_{lat} 这两个控制输入会同时影响无人直升机的横纵挥舞角 a 、 b 的动态，而挥舞角会对直升机型飞行器的横滚动态、俯仰动态施加影响，并进一步影响其它的无人机状态，这种不同操作通道同时对无人机状态产生影响的现象就是操纵耦合。

1. 无人机建模

数学模型既然这么有用，我们如何获取它呢？此时各种各样我们曾经学过却很少使用的物理公式终于要发挥作用了。

我们知道数学模型就是用数学的表达方式把无人机在物理定律下运动的情况描述出来，有哪些物理定律可以使用呢？

无人机系统运动受力和力矩的作用，在分析系统情况时常使用拉格朗日方程与牛顿-欧拉方程。

1) 拉格朗日方程

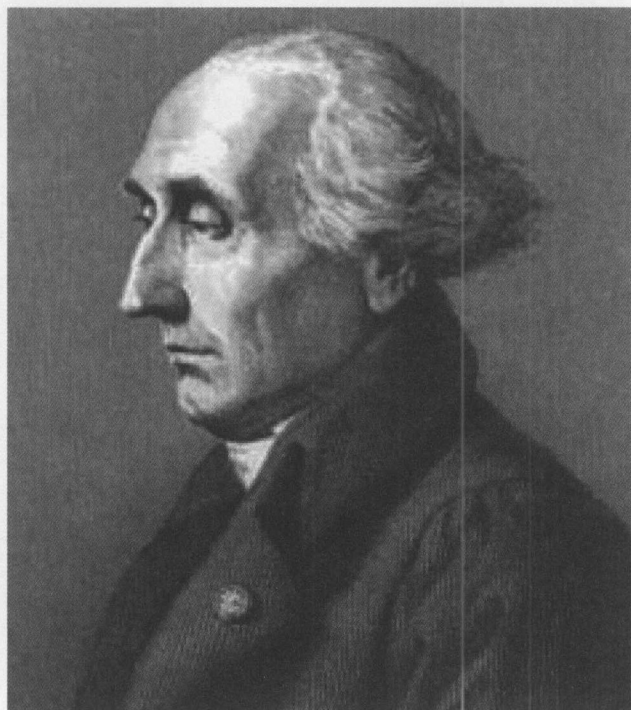


图 6.11 “一个人的贡献和他的自负严格地成反比，这似乎是品行上的一个公理”，数学家的身份，“严格地成反比”的描述都让这句话显得意味深长（图片来源：维基百科）

拉格朗日方程可能是机器人系统数学建模中使用最多的公式了，它不仅可以应用在无人机系统的学习和研究中，还可以应用在机械臂、双足机器人、四足机器人、地面轮式机器人、地面履带式机器人等领域。因此掌握拉格朗日方程可以让读者在众多应用领域中受益。

拉格朗日方程可以看作是对牛顿第二定律的一种“引申”，它引入了广义坐标，借助达朗贝尔原理推出了实质上和牛顿第二定律等价的结论。这也许能够给有项目压力或者专利指标的读者一个很好的启发：同样的一个事物，仅仅换一个思考角度就可以带来一些不同的收获。这并非投机取巧的行为。拉格朗日方程为什么会被如此多的工程师使用呢？原因在于应用拉格朗日方程分析系统时可以得到最少的动力学方程，同时在分析过程中也无须对具体的加速度运动有过多的投入。虽然拉格朗日方程在本质上与牛顿第二定律区别不大，但是这样一个新的角度却给问题的解决提供了很多便利（请思考问题：在我们的生活中是不是有类似的情形呢？换一个角度能带来哪些不同？）。

在进入拉格朗日公式前，先要引入一个称为拉格朗日函数的小东西：

$$L = T - V, \quad (6.17)$$

这个算子代表了整个系统中最为重要的部分：能量。其中 T 表示系统动能（Kinetic Energy）， V 表示系统势能（Potential Energy）。当有了这个算子后，我们就可以直接观察拉格朗日方程：

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i \quad (6.18)$$

其中 q_i 为广义坐标, Γ_i 为广义力。本节中不会介绍拉格朗日方程的推导, 但这并不会妨碍我们理解拉格朗日的本质, 如果读者对推导过程很有兴趣可以在附录中查找需要的参考文献或者任何一本分析力学书籍。拉格朗日方程与牛顿-欧拉方程都是将牛顿第二定律从惯性坐标系推广到更加“广义”的运动体系中, 虽然实现的途径略有不同。

前文已经介绍拉格朗日引入了“广义坐标”, 什么是广义坐标呢? 广义坐标是与“自由度”和约束相关联的, 前文给出了自由度的定义与理解方法, 在这里可以更深一层展开。

很容易理解无人机沿机身的三个坐标轴进行直线运动, 我们可以针对它的直线运动建立多个惯性坐标系, 我们也很清楚无人机可以围绕着机体坐标系的三个轴线进行旋转运动, 习惯上称之为俯仰旋转、横滚旋转、偏航旋转。无人机的直线运动可以放入我们熟悉的 R^3 空间中, 三个相互垂直的单位向量构成了一个显而易见的坐标系, 帮助我们描述无人机在 R^3 空间中的线性位置, 并且通过位置求导获取无人机直线运动速度信息。自然而然的, 我们会把这样的思考方式应用在旋转运动中, 但一个问题紧随而来: 旋转运动在这样的坐标系中怎么表示呢?

我们能够将无人机放在惯性坐标系中并且轻松理解对应的运动情况, 是因为我们很习惯将无人机看作质点。质点是非常常见的物理学概念, 大家在学习高中物理时会常常遇到这两个字, 回想一下很多高中物理考卷中对应力学题目的开篇通常是“某质点……”。显然把研究对象抽象为质点对于惯性坐标系下的运动描述是简单、直观的, 一旦产生旋转运动, 质点的描述功能就显得非常无力了, 一个质点怎么会发生旋转呢? 此时我们要把无人机看作刚体, 即在运动和受外力作用后, 形状与大小不变, 内部各点的相对位置不变的物体。刚体在空间的位置, 必须根据刚体中任一点的空间位置和刚体绕该点转动时的位置来确定, 这正是无人机六个自由度: $[X, Y, Z, \phi, \theta, \psi]$ 的来源。因此当引入了刚体后就多出了三个独立坐标来描述旋转运动, 与此同时, 拉格朗日引入了“广义坐标”, 使得约束可以也成为自由度计算的一部分。

刚体的概念把质点的运动描述从三维度空间扩展到了六自由度系统, 在这个系统里无人机有六个相互独立的参数来描述直线运动和旋转运动。通过广义坐标的概念, 将约束条件带入到系统运动中, 并在此基础上应用最为基本的, 由牛顿第二定律所揭示的力与运动之间的关系。

拉格朗日方程有多种形式, 式 (6.18) 可以称为主动力为有势力的拉格朗日方程。通过前文的介绍, 我们已经理解了无人机旋转运动下的自由度、无人机系统运动描述的广义坐标来源等, 现在我们终于可以定性地考察一下 (6.18) 中拉格朗日方程形式的直观物理意义。

$\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)$ 为能量差对速度的偏微分, 读者可以比照较为熟悉的惯性系统来理解, 在惯性系统中, 动能对速度的偏微分是什么呢? $\frac{dT}{dt} = \frac{d\frac{1}{2}mv^2}{dt} = mv$, 最后的结果就是动量。把这样的关系带入到广义坐标系中就得到了广义动量。广义动量可以是质点的线动量, 也可以对应于无人机系统的刚体旋转动量。而 $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)$ 则是广义动量对时间的导数, 读者可以对比一般动量

的情形： $\frac{dmv}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma = F$ ，由此可将广义动量对时间的导数理解为一个广义力。方程中的另外一个量 $\left(\frac{\partial L}{\partial q_i}\right)$ 是能量差对位置求偏微分，读者比较熟悉的是重力势能对位置的偏微分： $\frac{\partial mgh}{\partial h} = mg$ ，因此拉格朗日方程中，该量也是一个广义力。(6.18)式等号右边的定义也是广义力，因此整个方程等号的含义可以理解为：系统的广义惯性力与广义主动力相等。

把无人机系统的动能和势能带入到(6.18)中，可以得到无人机数学模型：

$$m \ddot{\xi} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ mg \end{bmatrix} = F, \quad (6.19)$$

$$J(\eta) \ddot{\eta} + \frac{d}{dt} \{J(\eta)\} \dot{\eta} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \eta} (\dot{\eta}^T J(\eta) \dot{\eta}) = \tau, \quad (6.20)$$

其中 $\xi = [X, Y, Z]^T \in R^3$ 为无人机系统的外环状态， $\eta = [\phi, \theta, \psi]^T \in R^3$ 为无人机系统的内环状态， $J(\eta)$ 为广义惯量矩阵， $F = [F_x, F_y, F_z]^T$ 为无人机在三个方向上受到的合外力向量。无人机外环姿态模型通过牛顿第二定律是很容易获取的，内环数学模型在通过一系列简化运算后可以得到如下形式：

$$\begin{aligned} \ddot{\phi} &= \frac{(I_y - I_z) \dot{\theta} \dot{\psi}}{I_x} + \frac{\tau_{bx}}{I_x}, \\ \ddot{\theta} &= \frac{(I_z - I_x) \dot{\phi} \dot{\psi}}{I_y} + \frac{\tau_{by}}{I_y}, \\ \ddot{\psi} &= \frac{(I_x - I_y) \dot{\phi} \dot{\theta}}{I_z} + \frac{\tau_{bz}}{I_z}, \end{aligned} \quad (6.21)$$

其中 τ_{bx} ， τ_{by} ， τ_{bz} 分别为无人机在机体坐标系中绕 X ， Y ， Z 轴所受的力矩。以四旋翼无人机为例，力矩分为两个部分，第一部分由螺旋桨的升力产生，具体升力公式可参考(5.2)、(5.3)式，计算力矩只要在乘以对应四旋翼操作方式：十字形、X形，旋翼中心到轴线的距离即可。第二部分来自于旋翼旋转时的陀螺效应，可用下面的公式计算：

$$\begin{aligned} \tau_x &= J_r \omega_y (\Omega_1 - \Omega_2), \\ \tau_y &= -J_r \omega_x (\Omega_1 - \Omega_2), \end{aligned} \quad (6.22)$$

其中 Ω_1 为无人机顺时针方向旋转的螺旋桨转速和， Ω_2 为无人机逆时针方向旋转的螺旋桨转速和。

通过拉格朗日方程推导无人机数学模型既可以加深使用者对无人机系统运动的理解和思考，也可以将动力学方程的数目减到最小。由于本节是在无约束情况下进行的计算，因此拉格朗日方程的优势并没有完全展现出来，但在真实的无人机系统中，任务可能会提出对无人机系统的实际约束，在这类应用中拉格朗日方程可以发挥出更多的功效。

2) 牛顿-欧拉方程

拉格朗日方程在使用中存在两个问题，一方面在采用拉格朗日方程获取无人机数学模型时采用了很多化简步骤才能得到(6.21)这样的简洁形式。另一方面推导过程和理解对于非物理专业的读者而言有着比较大的难度，虽然在前面的内容中花了比较大的篇幅来介绍拉格

朗日方程，以便读者建立更为直观的理解，但是不得不承认拉格朗日方程与我们的直观感触还是相差较远，它的证明过程比较抽象，引入了虚位移原理和广义坐标等概念，在实际应用中对数学运算和抽象理解能力要求较高。因此有没有一种相对而言更为直观的无人机数学模型推导方式呢？既然引入了刚体这样方便的概念，能否运用更加熟悉的传统力学方式来进行推导呢？这就引出了无人机数学模型推导的另外一种方法：矢量动力学，又称为牛顿-欧拉动力学。下面给出无人机系统所对应的牛顿-欧拉方程矩阵形式：

$$\begin{bmatrix} mI & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{v}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\omega} \times m\mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \times I\boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_b \\ \boldsymbol{\tau}_b \end{bmatrix}, \quad (6.23)$$

其中 I 为一个三阶矩阵，对于多旋翼无人机，可以直接简化为对角阵，对角元素分别为无人机在三个方向上的转动惯量； $\mathbf{v} = [\dot{x}_b, \dot{y}_b, \dot{z}_b]^T = [u, v, w]^T$ 为无人机沿机体坐标系三个方向上的线性速度向量； $\boldsymbol{\omega} = [p, q, r]^T$ 为无人机角速度向量； $\mathbf{f}_b, \boldsymbol{\tau}_b$ 分别为无人机在机体坐标系下受到的合外力、合外力矩向量。(6.23) 可以直接看作牛顿第二定律在旋转刚体中的应用。在这里我们要特别提到叉乘运算，这种运算方式只用于三维线性空间，具体计算方法：设三个向量 $\vec{a}, \vec{b}, \vec{c}$ ，假设 $\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$ ，有：

$$\begin{aligned} \vec{c} &= A \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = -B \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}, \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & -b_z & b_y \\ b_z & 0 & -b_x \\ -b_y & b_x & 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6.24)$$

其中矩阵 A, B 分别为由 \vec{a}, \vec{b} 对应元素构成的反对称阵。 \vec{c} 的方向符合右手定则，垂直于 \vec{a}, \vec{b} 向量所确定的平面。

欧拉方程与拉格朗日方程在结果上是完全一样的，习惯上采用拉格朗日方程获取无人机内环动态时进行小角度化简，即认为 $\dot{\phi} \approx p, \dot{\theta} \approx q, \dot{\psi} \approx r$ ，而它们之间的实际关系应为：

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin\phi \tan\theta & \cos\phi \tan\theta \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi \sec\theta & \cos\phi \sec\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = S\boldsymbol{\omega} \quad (6.25)$$

当下的很多无人机产品或飞行控制器都提供限速功能，比如将无人机的飞行线速度限制在 10m/s 以内，或者垂直速度限制在 5m/s 等，此时无人机沿三轴线运动，姿态角都比较小，因此可以认为 S 矩阵约等于单位阵。

无论是使用拉格朗日方程还是牛顿-欧拉方程，我们都可以得到关于无人机系统 12 个状态的完整数学表达式，在这里结合式 (6.10), (6.19), (6.21) 给出：

$$\begin{aligned}
 \dot{\xi} &= R_{N/B} \cdot v, \\
 \dot{u} &= vr - wq - g\sin\theta + \frac{F_x}{m}, \\
 \dot{v} &= wp - ur + g\sin\varphi\cos\theta + \frac{F_y}{m}, \\
 \dot{w} &= uq - vp + g\cos\varphi\cos\theta + \frac{F_z}{m}, \\
 \dot{\eta} &= S \cdot \omega, \\
 \dot{p} &= \frac{(I_y - I_z)qr}{I_x} + \frac{\tau_{bx}}{I_x}, \\
 \dot{q} &= \frac{(I_z - I_x)pr}{I_y} + \frac{\tau_{by}}{I_y}, \\
 \dot{r} &= \frac{(I_x - I_y)pq}{I_z} + \frac{\tau_{bz}}{I_z}.
 \end{aligned} \tag{6.26}$$

2. 无人机数学模型与实物的关联

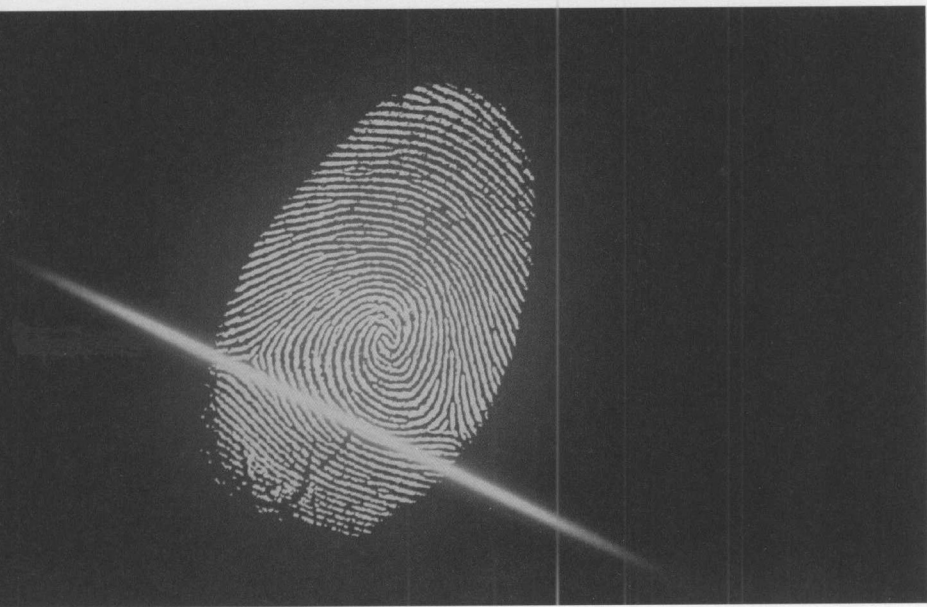


图 6.12 数学模型并不等于实物，而这正是数学模型的重要优势之一。对于具体工程而言，实物包含了太多冗余信息，数学模型则可以看作在工程需求下对实物某些性质的描述和深度呈现（图片来源：pixabay）

无论读者是否曾在自己的工作中使用多旋翼无人机或者是否有过无人机 DIY 的经历，都可以从外形或者基本功能上区分出无人机的各个部件，如机身长什么样子，机架有什么功能或无人机的螺旋桨、主旋翼、定距桨是如何安装的，以及各种注意事项等等。我们都有通过直接的观察或亲手的操作来取得对无人机感触与理解的经验。毫无疑问，这些直观感触都将成为读者对无人机系统理解的一部分，帮助读者在脑海中构建起一系列的概念，如：什么是无人机、无人机长什么样子、无人机的组成、无人机的具体功能等等。

然而这类通过经验、观察、实践积累的理解很容易受到两方面限制：



图 6.13 仅依靠直观感触与经验就犹如站立在浮冰之上，随着时间的推移“浮冰”会变得越来越不完整，在日新月异的“阳光”之下不断消融。但如果能顺着浮冰漂流的轨迹踏上坚实的“陆地”就要安全得多
(图片来源: pixabay)

1) 滞后性

当牛顿被苹果砸到头之前，万有引力定律就已经存在了，牛顿只是“发现”了这个定律，而不是“创造”了它。与此类似，我们通过直观感受每次建立起来关于无人机的理解都是早已经存在的无人机本质在阳光下瞬间的闪现罢了，而那些没有闪现的并非不存在，只是我们还没有看到而已。我们的眼睛只能看到已经被摆上桌面的事物，我们的经验只能从已经发生过的实践中总结出来，我们的经验与直观感触不可能超越事件的发生时间，而创新正是创造出未有之物，如果我们的理解和认识不能跳出被时间局限的经验范畴，就会对研究和项目造成很大困扰。

2) 局限性

这种局限往往体现在深度和精确度上。我们很容易通过第一印象建立对一个人的感觉和评价，但真正了解一个人却需要长久的相处。当我们用自己的双眼去观察时可以获取一定的信息，比如我们可以说一个人很高，但有多高呢？就需要进一步的精确测量才能知道。前文描述过无人机的耦合现象，操作者可以在飞行过程中，真实地感受到耦合的存在，但是这个耦合量有多大呢？和哪些变量相关联呢？受哪些因素的影响呢？是由哪些规律造成的呢？如

果我们只有经验作为参考将会很难回答这些问题，至于如何消除这种耦合，如何利用这些耦合就更是无从谈起了。

在本节开头已经说过，数学模型可以帮助我们定量分析无人机内部的结构、性质。但“可以”是一回事，“怎么做”是另外一个问题：数学和实物怎么产生联系呢？当我们把数学模型和实物的桥梁打扫干净后，如何去使用它就是显而易见的了。

我们可以用数学公式来建立无人机每个部分、每个方面的数学描述。比如旋翼尺寸，扭矩，在相关公式中的计算和使用，或电池的电能、电量、最大放电电流，与动力系统功率计算公式的对应关系，或起落架尺寸，姿态变化边界，与干扰力矩区间计算公式间的关联等。这些参数和公式可以让我们把无人机的每个部分“数字化”，慢慢地会记住哪些是我们在项目和研究中常用的参数，以及与这些参数与其他参数或公式的关系等。在这样的过程中，我们在实际系统里，通过实物与数学模型之间的不断转化才能真正掌握公式的价值和使用方法。（请思考问题：还有哪些方法和研究环节能够帮助我们使用无人机的数学模型呢？）

6.5 控制的基础概念

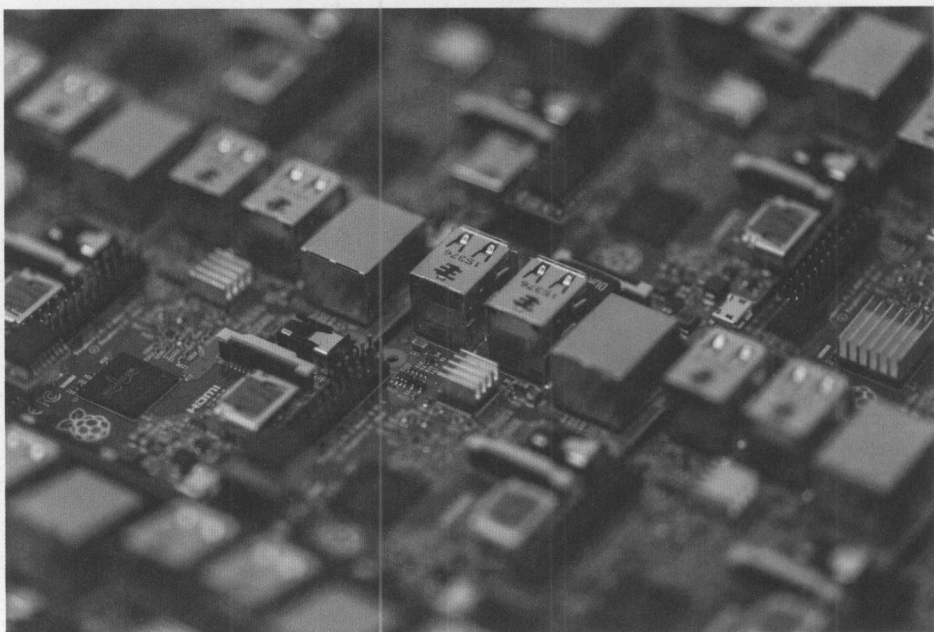


图 6.14 处理问题，完成任务绝不只是堆砌硬件（图片来源：pixabay）

控制看上去是个很高大上的词，好像一谈到它就一定要跟无人机、机械臂、机器人相关联，然而事实上它在我们生活中是最普遍不过的事情。控制是一件我们每天、每时、每刻都在做的事。当城堡在电脑前打出这些文字时，要按照脑海中对键盘的记忆来操控手指根据输入法规则敲击并选择出合适的文字。当大家在篮球场上比赛时，运动员需要控制脚步、速度、移动、姿势来完成每一个投篮动作。在我们的工作中会遇到各种项目、任务，需要按照预先的项目机会来调节时间分配、资源分配、任务规划等。还可以举出无穷尽的例子，控制实在是太普遍，以至于我们常常忽略其中的过程。

对于无人机系统的控制而言（请思考问题：控制与自动控制有什么区别？你能给出尽量详细的定义么？），我们可以从实际的硬件系统与数学模型两个角度对控制进行理解，这样的

思考方式可以让读者把第四章,第五章和第六章的内容衔接起来。

请读者联想 4.3 节关于多旋翼无人机的介绍内容,该机型无人机通过成对改变定距桨转速来控制姿态,通过姿态的变化实现直线方向上的位置变化。结合 5.5 节的内容,多旋翼无人机的控制可以归结为对定距桨转速的控制,当我们能够让系统提供合适的转速时,多旋翼无人机自然会实现期望的运动形式。而定距桨的旋转是由无刷电动机控制的,因此我们再向前推进一步,无人机的控制可以归结为无刷电动机调速问题。电动机的电流是由电调提供的,电调接收飞控板或遥控器接收机的控制信号,通过芯片对控制信号进行解码,按照控制要求提供相应的控制电流,从而完成电动机调速。根据 5.3 节的内容,控制信号根据无人机硬件结构的不同,可以是操作者通过遥控器发送过来的直接操作信号,也可由飞控板根据任务要求和操作输入以及相应的控制算法生成。这样的流程将之前的硬件系统串接起来,有助于读者形成完整、直观的理解。(请思考问题:能否把硬件系统的其他部分引入到控制流程中呢?请读者自己将结构图画出来)

从数学模型上如何理解这个流程呢?我们先把在上一节中得到的式(6.26)列写出来:

$$\begin{aligned}\dot{\xi} &= R_{N/B} \cdot v, \\ \dot{u} &= vr - wq - g\sin\theta + \frac{F_x}{m}, \\ \dot{v} &= wp - ur + g\sin\phi\cos\theta + \frac{F_y}{m}, \\ \dot{w} &= uq - vp + g\cos\phi\cos\theta + \frac{F_z}{m}, \\ \dot{\eta} &= S \cdot \omega, \\ \dot{p} &= \frac{(I_y - I_z)qr}{I_x} + \frac{\tau_{bx}}{I_x}, \\ \dot{q} &= \frac{(I_z - I_x)pr}{I_y} + \frac{\tau_{by}}{I_y}, \\ \dot{r} &= \frac{(I_x - I_y)pq}{I_z} + \frac{\tau_{bz}}{I_z},\end{aligned}$$

一共 12 个状态的动态方程,我们可以看出对这些状态进行控制的输入量为合外力向量与合外力矩向量,因此当我们进一步研究时,可以写出不同机型无人机的输入动态,探寻这些合外力和力矩的具体表达式,就可以了解输入信号是如何影响输入动态并形成相应的合外力与力矩,进而控制整个无人机系统。

如何把这两个视角整合起来呢?从硬件角度分析,控制信号是由飞控板根据程序生成的,这些程序是如何写出来的呢?是根据对无人机数学模型的控制要求的数字化结合相应控制算法来实现的。如何根据系统要求写出相应的控制算法呢?这就是本节的核心内容了。先让我们了解一些自动控制的基本概念,这些概念将成为我们设计控制算法的有力工具。

1. 开环与闭环

开环的英文名词非常形象:Open-Loop。与之对应,闭环的英文名词:Closed-Loop。它们描绘了自动控制最基本的结构。

如何理解闭环系统呢?从字面上来看是一个封闭的“环”,这个环是关于什么的呢?举

个例子，当大家使用电子地图进行路径导航时，首先打开自己的地图软件，我们会在电子地图中发现自己的位置，当我们输入目标地的位置信息后就会在电子地图上出现对应的标注，表明目标地的位置。当我们点击导航按钮之后，按照电子地图的提示路线行进，会看到我们在地图上的位置点在不断发生变化，电子地图会根据目标位置与我们当下的位置不断跟进，帮助我们最终到达目的地。

在上面的例子中，整个导航系统构成了一个闭环系统，实现闭环的信息是“位置信息”。通过这个闭环，不断对比我们当下的位置与期望位置，最终实现有效的路径导航。那么开环又是怎样的呢？请大家再来看一个导航的例子，当我们获取自己的位置信息以及目标地位置信息之后，心里想：实时导航太浪费流量了，不如我直接记住怎么走。当我们知道了目的地“参考”位置后，可以撇开检查自己位置的环节，只要在脑海中记住目标位置，并了解该怎么走就可以了。在这个导航方案中，虽然我们也在不断变换位置，但并没有位置信息的闭环，也就无法拿出数据和“参考”进行比较，但凭着记忆和预先计划的执行方案最终实现了位置导航的要求，这就是开环系统。

通过上面的例子可以看出，开环系统与闭环系统的核心区别在于是否进行输出信息或状态信息的反馈，即例子中的个人位置信息反馈。当我们选择记住导航位置直接前往时，节省了流量资源，也不用每时每刻打开 APP 进行查询，可一旦走错了路就会花费更多时间。同样的，开环系统往往有着更低的成本和更快的调节速度，然而一旦系统控制产生误差就会遇到很大的麻烦。相反的，闭环系统增加了反馈环节，虽然导致系统成本上升，并会降低响应速度，但能使整个系统更加“稳定”，因此绝大多数系统都是采用闭环结构，开环系统只针对少数情况。

2. 误差

控制算法工程师是一类什么样的人呢？一个很形象的描述是，他们是一群到哪里都先寻找误差的人。几乎所有的闭环系统控制算法都是基于误差进行修正，因此误差信息是闭环系统实现控制的核心要素。什么是误差呢？误差是“参考”信息与“实际”信息之间的差值，在无人机系统中可能是某种智能算法规定的期望速度与实际速度差值，也可能是期望轨迹与无人机位置信息间的差值等等。我们可以大致认为在整个无人机控制系统设计中，最应关心的就是两个问题：①如何形成“高质量”的误差信息；②如何消除误差。当我们实现这两个目标之后，一个完整、优秀的控制系统也就建立起来了。（请思考问题：能够围绕哪些要素建立控制系统？）

3. 反馈

如果说消除误差是控制系统的核心，那么反馈就是实现这个核心的必经要道。参考第五章无人机硬件的相关内容，一套完整的无人机系统最昂贵的部分往往是反馈环节中所涉及到的各类传感器。

正是由于反馈在控制系统中如此重要，第五章中所有的传感器几乎都可以归纳到无人机系统或某个子系统的反馈环节中，只有通过反馈才能形成系统误差。以实际的无人机系统为例，无论哪种无人机机型，（请思考问题：可以跨越所有机型的内容在本书中出现过几次？）当我们想要实现一个针对姿态信息的闭环控制系统时，根据任务要求（可能是方案计划书，也可能是产品对应的某种自动功能）可以知道目标姿态，只有当我们通过 IMU 获取无人机当下的姿态信息，并传递给控制器后才能计算出当下的姿态误差信息。

反馈不是直接把“实际”信息传递回来就可以了么？为什么还需要进行运算呢？

提供高质量的误差是无人机系统反馈环节的根本任务。但在很多情况下我们得到的反馈信息是不精确的。如果我们将反馈信息看作传感器硬件与算法共同构成，这种不精确性的出

处就很容易找到了。举一个简单的例子，当我们想要获得一个长度数据时，会根据不同的任务要求来确定所需的数据精度，一旦精度确定后就可以选择合适的测量硬件，如不同标度的直尺、游标卡尺、激光测距仪等。之后我们使用所选择的测量硬件进行工作，然而误差总还是存在的，也许是由于测量硬件本身的问题，也许是我们操作的时候想起了什么不愉快的事情。总之虽然我们更想精确地获得闭环系统误差，但会有各种各样的因素影响到系统反馈信息的质量。

在前面无人机姿态控制的例子中，我们没有办法直接获取姿态角的反馈信息，因此只能借助 IMU 硬件获取“角速度”信息和“线性加速度”信息。这时不同的反馈方法就产生了，我们既可以通过对角速度的积分获取姿态，也可以通过线性加速度与重力的关系获取姿态数据，而不同的计算方法有时会对系统性能产生很大影响。

6.6 无人机控制的算法实现

现在让我们稍微停一下，是时候清点一下“装备库”了，看一看到此为止我们手上有哪些工具，掌握了哪些技能。

在 6.1, 6.2, 6.3 节中我们建立了无人机运动过程中所需要的坐标系、转换矩阵、姿态表示方法。在 6.4 节中我们掌握了两种求取运动系统数学模型的方法，并得到了描述无人机系统十二个状态的数学模型。6.5 节中介绍了无人机系统中基础且实用的控制概念。

我们可以通过它们做些什么有趣的事情呢？使用这些转换矩阵，我们可以将不同坐标系下的数值匹配起来，通过不同坐标系中对同一向量的描述，结合姿态的表示方式可以让我们求得无人机当下的运行姿态。当这些内容与第五章的反馈环节结合使用时，我们就实现了一般无人机十二个状态的反馈。通过拉格朗日方程和牛顿-欧拉方程结合第五章中涉及的硬件公式，我们可以初步建立无人机系统的数学模型，一旦获得了数学模型，我们就可以在电脑上进行控制算法仿真和半实物仿真。通过对基本控制概念的掌握，我们可以建立起一个闭环，基于误差反馈修正的控制算法。

控制系统设计是无人机系统设计中的一部分，在实现过程中这部分的复杂程度有可能因实施方和具体任务而展现出很大的差异。研究室中需要挖掘每个环节的创新点，往往需要将数学模型推导、算法仿真、半实物仿真、系统验证等环节全部走一遍。但对于一些企业而言，快速形成产品迭代是第一要务，如果在研发链条上投入太多人力与物力可能会造成太大消耗，因此常常会省去一些仿真或验证环节。还有一些产品由于飞行环境异常复杂，系统要求高，必须进行验证，可成本又比较高，比如近地火箭等，研发过程必须囊括半实物仿真的相关内容。对于读者而言，不同的工作要求，不同的项目细节，不同的产品特点会产生不同的工作内容。如果要囊括其中的全部内容确实要花费大量的时间和精力，而且在工作项目中未必能够完全应用到。

因此本节将重点放在控制算法的程序实现上，无论是算法仿真，半实物仿真，还是直接进行产品实现，都离不开算法的程序实现。希望能够让读者实现从算法到程序的无缝转换。

1. PID 控制

PID 控制及在它基础上衍变而来的控制算法是当今无人机系统乃至各类工程系统中最常使用的算法。它属于线性控制算法，根据误差计算控制量的方程如下所示：

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (6.27)$$

其中 e 表示期望状态与实际状态间的差值。从上式的结构中可以看出控制器各个部分

代表的含义：误差倍数（比例项），误差积分（积分项），误差变化率（微分项）。在仿真系统中可以使用式（6.27），然而在实际系统中，一般使用比例积分控制器（请思考问题：为什么会产生这样的区别？），即下式：

$$u = K_p e + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (6.28)$$

2. PI 控制器的离散化

通过公式（6.28），我们不但清楚了控制信号与误差之间的计算关系，也掌握了控制信号的组成结构。但这似乎还不够，我们不能直接把公式摆在计算机面前，告诉它“我已经写好了，需要你帮我实现它”，我们必须用计算机能够“理解”的方式把算法公式表达出来。

算法的离散化有两种方式，一种比较直观，根据已有控制器的结构写出各部分的离散化实现，另外一种通过离散化算法对连续算法进行离散化。本节会分别介绍这两种方法。

第一种方法根据 PI 控制器的结构，在计算第 n 步控制量 $u(n)$ 时，只要分别计算第 n 步比例项控制量 $u_p(n)$ 和第 n 步积分项控制量 $u_i(n)$ 并求和即可得：

$$u(n) = u_p(n) + u_i(n), \quad (6.29)$$

积分项可以直接看作单位时间上的误差积累。公式（6.28）中，输出量是关于误差的连续函数。设 $e(n)$ 为第 n 步系统误差， K_p ， K_i 分别为 PI 控制器的比例系数和积分系数。根据（6.28）很容易得到第 n 步控制量比例项计算公式：

$$u_p(n) = K_p e(n), \quad (6.30)$$

积分部分有不同计算方法，可以采用矩形法，也可以采用梯形法，不同的方法计算量和逼近效果会有一定区别。为了方便理解，我们不妨采用最简单的形式：

$$\begin{aligned} u_i(n) &= K_i \cdot e_i(n), \\ e_i(n) &= e_i(n-1) + e(n) \cdot T, \end{aligned} \quad (6.31)$$

其中 $e_i(n)$ 为第 n 步误差的积分值， T 为采样时间。将（6.30），（6.31）代入（6.29）即可得到第 n 步控制量与误差量间的直接关系：

$$u(n) = K_p e(n) + K_i [e_i(n-1) + e(n) \cdot T]. \quad (6.32)$$

PI 或 PID 控制器为线性控制器，且结构简单明了，我们可以很方便地写出对应的控制算法。然而在很多情况下需要一种适用性更广的方法，这就是控制领域中常用的连续函数离散化方法（请思考问题：为什么需要连续函数的离散化？）

离散化的方法有很多如欧拉法和塔斯汀法等，不同方法的区别主要体现在从 S 域到 Z 域的变换方式上，如果读者对这些控制学的名词感到陌生也不要紧，可以直接理解为用离散来逼近连续的不同近似方法即可。

有兴趣的朋友可以翻开任何一本控制学教材，都会有 Z 变换或离散化的相关章节。或者打开 Matlab，输入：help c2d，学习说明文件，会有“zoh”“foh”“impulse”“tustin”“mached”等不同离散化方法的详细介绍。

在这里我们可以把 PI 控制器看作一个以误差为输入量，控制信号为输出量的线性传递函数。对公式（6.28）进行拉普拉斯变换，求得传递函数（请思考问题：PID 控制器的传递函数是怎样的？有着怎样的特点？）：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p \cdot s + K_i}{s}, \quad (6.33)$$

接下来要将传递函数从 S 域转换到 Z 域，在这一步中体现出了不同离散化算法的区别。如欧拉法，S 域到 Z 域的转换公式为：

$$s = \frac{z-1}{T}, \quad (6.34)$$

而塔斯汀法，S 域到 Z 域的转换公式为：

$$s = \frac{2(z-1)}{T(z+1)}, \quad (6.35)$$

不同离散化方法之间的区别与第一类离散化策略中不同积分逼近算法的区别，在本质上是是一样的。我们不妨采用欧拉法，将 (6.34) 带入到 (6.33) 中，可以得到如下方程：

$$U(z) = U(z) \cdot z^{-1} + K_p E(z) - K_p E(z) \cdot z^{-1} + K_i \cdot T \cdot E(z) \cdot z^{-1}, \quad (6.36)$$

最后一步是将 (6.36) 式从 Z 域转化为差分方程，令 $U(z) = U(n)$ ， $E(z) = E(n)$ ，并将下式：

$$z^{-k}x(n) = x(n-k) \quad (6.37)$$

带入 (6.36)，即可得到 PI 控制器的差分方程：

$$u(n) = u(n-1) + K_p e(n) - K_p e(n-1) + K_i \cdot T \cdot e(n-1) \quad (6.38)$$

当我们对 $u(n-1)$ 进行迭代运算，就可以得到与 (6.32) 一样的结果了。

3. 开源飞控的 PID 算法实现

开源飞控为我们提供了丰富的研究、实践、学习资料。分析由全球无人机爱好者、研究者、工作者共同完成的代码，会在很多方面对我们产生帮助，同时也为大家提供了很好的平台去锻炼自己的实际工程能力，写出好的算法，做出好的系统与来自全世界的朋友分享。

为了平衡硬件与算法实践难度，本小节会以 Multiwii 开源飞控为例，挑选 2.3 版本控制器实现的部分代码与大家一同分析。完整代码或其他开源算法中的实现过程，大家可以通过互联网找到。

在控制器设计中往往会涉及三个方面：误差的获取，基于误差的算法实现，控制信号的生成和输出。在这其中“误差”的作用和意义犹如散文中“形散而神不散”的“神”，让我们借着它轻松理解整个算法结构。可以看到下面的代码：

```
error          = rc - imu.gyroData[axis];
errorGyroI[axis] = constrain(errorGyroI[axis] + error, -16000, +16000);
```

这两行代码的作用是通过陀螺仪传回的数据，计算无人机角速度的误差。其中 `constrain` 为限幅函数，`constrain(a, b, c)`，是将三个输入变量中的 `a` 限制在 `b, c` 组成的区间中。代码中 `errorGyroI[axis] + error` 体现了上一小节中积分运算的程序实现方式。

```
ITerm      = (errorGyroI[axis] >> 7) * conf.pid[axis].I8 >> 6;
PTermACC   = ((int32_t) errorAngle * conf.pid[PIDLEVEL].P8) >> 7;
```

在这段代码中 `ITerm` 和 `PTermACC` 分别是 PI 控制器中的积分项和比例项。其中 `ITerm` 等号右边的代码中的 `errorGyroI[axis]` 即为三个误差的积分项，`conf.pid[axis].I8` 实际上是 PI 控制器中的积分项系数 K_i ，因此 `ITerm` 的整个计算代码本质上就是计算了控制量的积分部

分： u_i 。而 PTermACC 对应的代码就是计算控制器的比例部分： u_p ，其中 `errorAngle` 为对应的角度误差，`conf.pid [PIDLEVEL].P8` 则是飞控设置中写入的比例项系数 K_p 。

上面两段代码虽然很简单，可当我们真正进行代码实现时，必须熟悉所使用的语言工具，了解其中的语法规则和计算规则，并能够从中抽象出控制器结构，或者把控制器结构用合适的代码表示出来，还要注意对于编程而言非常重要的格式、注释习惯等，这些内容都需要读者慢慢在实践中进行积累。（请思考问题：上面这些内容哪些是你工作中需要的？哪些你并不需要？）

第七章

建议与资源详解

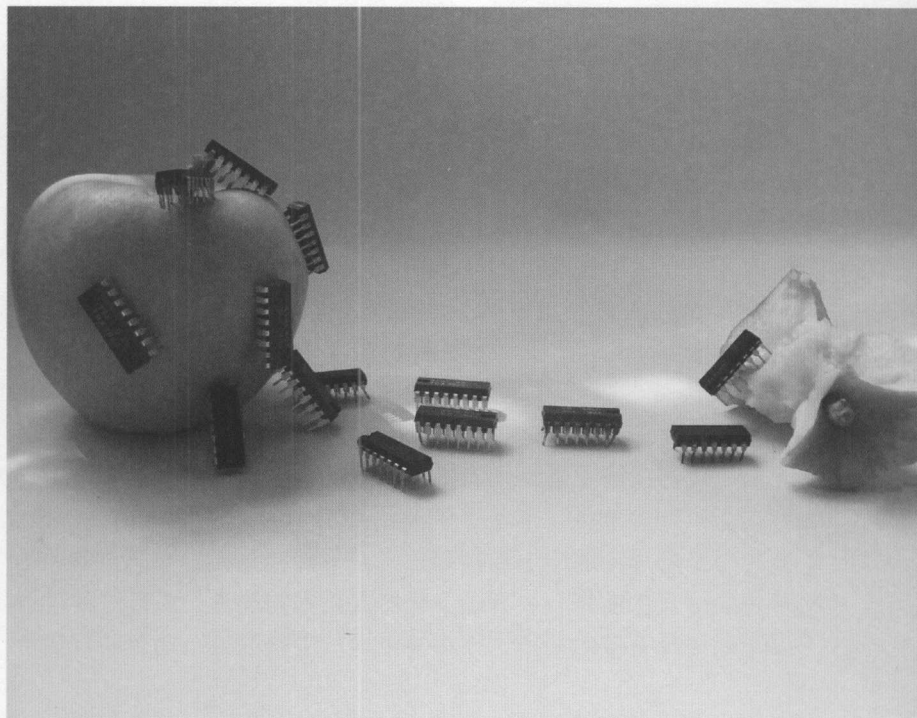
通过前面的内容，读者已经对“无人机”形成了自己的理解，包括常见机型结构及控制方式，当下无人机硬件系统的组成结构，常见器件的基本原理，无人机硬件设计中的常用公式及方法，导航与坐标系知识，无人机数学描述的意义与作用，控制器设计的基本概念和实现方法等。（请思考问题：上面这些内容在无人机发展历史上是以怎样的具体形式出现的？）

无人机行业发展迅速，对具体知识和技能的需求不会一成不变，因此对当下技术的理解和消化不是终点，而是形成对无人机技术的理解，从而为进一步研究、学习、实践创造条件的起点。前六章的具体内容可以帮助读者站在无人机行业的跑道上，但我们还需要思考一些在后续奔跑过程中一定会遇到的问题。

本章涉及的内容主要包括两方面。首先城堡会与读者共同探讨一些在后续学习、研究、工作中不断出现的话题。之后城堡将对常用的资源、平台、工具等进行分类，并为读者的使用提出建议。

7.1 付出与积累

图 7.1 苹果要一口口啃，
积累要一点点来（图片来源：
pixabay）



经常听到这样一句话：现代社会的节奏太快了。城堡同意这句话的观点，但它太含糊，就像羞怯的歌姬，将一半面容隐藏在琵琶后面。表面上大家对快节奏生活下的紧张和压抑感到抵触，但实际上却又义无反顾地投入其中。“人在江湖，身不由己”确是一重原因，但推着我们投身其中的本质力量却来自我们的内心，越来越快的节奏表明我们不止想要更多，还期望更快获取。（请思考问题：真是这样么？请读者思考自己的真实情况）

这样的情形很普遍，无论读者来自于哪一行，都会有自己切实的体验。虽然对该话题的探讨具有广泛意义，但为了避免话题太宽泛，后面的讨论将把对象局限在与无人机相关的领域中。（请思考问题：在我们的生活中有哪些是既想得到，又想尽快得到的呢？或者我们对所有事物都抱着此种观点？）

虽然无人机有着不短暂的历史，但它在我国作为独立行业，存在和发展的时间却并不长。在相当长的一段时间中，它是作为研究项目或研究课题存在于实验室中的。记得城堡在2013年做外场飞行实验，出租车司机师傅听到“无人机”三个字还不明所以。短短三年，无人机却迅速成为大众耳熟能详的热门词汇，甚至很多高校在极短时间内，雨后春笋般地开设了很多与无人机相关的专业。这几年，无人机公司、无人机产品、无人机及相关行业的从业人员均呈井喷式发展，与城堡有过合作的相关企业大多在两三个城市设有自己的办事处。在巨大关注度的背后，少不了大量人力、物力、财力的投入，而与投入相伴的则是对回报的更大期许。（请读者思考：自己对无人机有着怎样的期许？）

希望是美好的，但脱离了实际就容易变成欲望，而欲望就像酵母一样，能让一团面发起来。一个无人机公司，30人左右的规模，成立时间一年左右，估值上千万美元的情况，这两年在行业中是屡见不鲜的。

行业如此，个人也是这般。城堡经常在自己的知乎专栏中会通过私信与读者进行互动。有一些朋友的问题如“如何在一年内掌握所有无人机技能”“请您帮忙看一下我现在的项目能融多少钱？”“两三年如何在无人机行业成为资深工程师？”等，会让城堡担心这些读者是否急于求成。

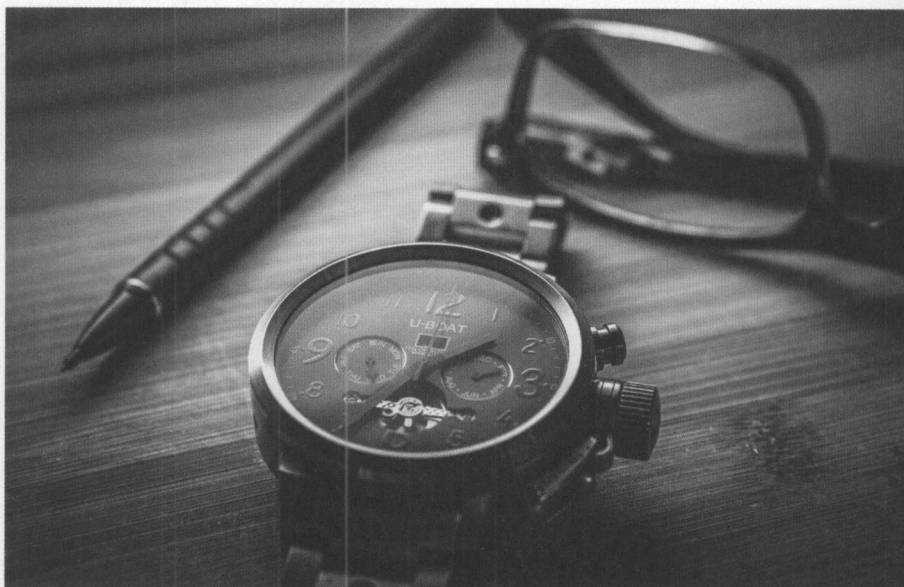
无人机行业是朝阳行业，有更多的朋友希望进入这个行业是好事，至于目的，只要在法律的允许范围内，都是无可厚非的。毕竟在市场经济下，扎实的知识、优秀的技能就可以对应更高的回报。但另一方面，不菲的回报自然要匹配更高标准的付出与更长时间的积累。如果不认清这一点，只希望快速获利，不想长久付出，无论是行业、企业还是个人都免不了在某个时间节点上补交落下的“学费”。

不仅是无人机行业，在任何领域中，专业知识与技能的掌握、熟练都不可避免地需要耗费大量时间、精力，在不断的思考中进行理解。有时一个已经完成的项目在不同的职业阶段会带给一个工程师不同的思考和感悟，可一旦中途放弃或自满懈怠都会前功尽弃。

所以任何决定要进入无人机行业或者已在行业中并希望得到发展的读者，要把心沉下来，做好奋力奔跑的准备，不断了解前沿产品与技术发展方向，不断接触新的项目和科技成果，不断思考基础理论的应用和指导意义，不断尝试把这些理解应用在实际系统中。这些工作的循环将会一直伴随每一位有志于机器人技术的读者，而且这种付出是要持续整个职业生涯的。只要不断保持有效的积累，你将慢慢地从中获取自己期待的收获。

7.2 技术与焦虑

图 7.2 凌晨一点半是很多
工程师休息的标准时间
(图片来源: pixabay)



相信无人机工程师对下文描绘的场景一定有切身体会：一边加班，一边写代码，一边接生产部门电话，一边思考产品系统设计，一边筹划着为下一个算法测试做准备。

一方面，无人机行业是如此有魅力，与它相关的每一个项目，每一个设计任务都像一场奇妙探险或悬疑推理，工整狡黠的程序，奇妙优雅的计算，眼花缭乱的硬件，种类繁多的工具，炫酷迷人的功能以及丰厚的报酬都会让人心甘情愿地把时间花在上面。

但另一方面，科技的快速发展，让无人机技术在硬件平台、系统结构、算法种类、程序实现等方面更新的速度越来越快（请思考问题：无人机发展史上不同技术的更新速度是怎样的？更新快慢受哪些因素影响？）。可能今天还在谈论 PID 控制，明天就需要使用神经网络 PID 工具包，后天则要求基于视觉进行任务规划设计。在这样的发展速度下，我们可能根本没有时间停下来思考这些问题：哪种技术才是无人机领域的前进方向？明天会推出哪些无人机硬件平台？我是不是也应该参与一下人工智能项目？学习算法会不会越来越广泛地出现在无人机设计中？等。高强度的任务及行业的快速发展与有限的时间、能力之间的矛盾像一个无解的黑洞，把工程师的全部生活吸入其中，吞噬掉一切满足和骄傲，只留下黑暗中的焦虑与无助。

这些焦虑情绪会将触角延伸到工程师生活的方方面面，从而对工程师的正常工作、身体健康、社交娱乐等造成影响。这些焦虑是由工作与行业特点决定的，这意味着任何无人机工程师都会或早或晚地面对这一问题。从某种意义上说，处理上述焦虑将是每位工程师职业发展的必经环节。

针对上述情况，城堡有两点建议：①有选择地积累；②接受自己的局限性。

1. 关注有效积累

有效积累特指与自己职业发展，研究方向一致或有直接关系的知识、技能、经验等方面的积累。

从无人机自身来看，作为空中智能机器人，它是跨学科产物，涵盖的知识范围广泛，跨越的学科专业较多。若从行业角度出发，无人机是一个相对年轻的行业，发展时间较短，行

业成熟度较低，行业标准与职业分工并不完善。

多学科的特点与行业发展的不成熟性使得不同无人机公司在职业名称、职业内涵、职业要求、职业发展等方面并不一致，如有些公司大力进行视觉技术积累，有些公司则特别关注控制技术积累；有些公司只招收硬件类工程师，还有些公司招收算法类工程师；一些公司中工程师只需要负责中间层的接口部分，在另一些公司中还需要兼顾上层系统的软件设计，甚至在某些公司中被要求修改控制算法。这样的情况可能让初入无人机行业的年轻工程师感到困惑，不清楚自己应该积累哪些领域的知识或者干脆对任何领域来者不拒，均等地投入时间。这些都可能造成无效积累。

上面的分析表明我们无法通过已有的规范、体系进行有效积累，所以每位工程师需要自己趟出道路来。

这时一些具有普遍意义的准则将可以帮助我们寻找正确的方向。首先，每一位工程师需要形成自己对无人机的理解，至少包括本书前面章节中的全部内容，如无人机经过了哪些发展阶段？每个阶段的演变过程是怎样的？推动阶段变化的突破技术有哪些？这些技术及对应硬件在当下的无人机系统中是怎样的表现形式？当下无人机系统的硬件体系是怎样的？系统架构是怎样的？在不同行业中硬件和系统架构有哪些变化？这些变化体现了哪些无人机或行业特点？等等。通过对这些问题的不断思考来丰富我们队无人机的感触，从而形成自己的认识。

这种认识通过历史与现在形成对当下和未来的理解。依托着这样的理解，工程师可以结合自己的教育经历、技能背景、爱好特长等实际情况进行职业规划，选择与自己技术规划相匹配的无人机公司中合适的职位。正确的选择在有效积累中显得格外重要，而有效决断离不开与自己实际情况相匹配的职业标准。

2. 接受自己的局限

优秀的无人机工程师都是处理问题的高手，他们乐在其中，不惧怕挑战和风险。这种状态的持续容易让人产生一种错觉：我可以并且应该完成一切任务。这当然会给他们带来非常大的压力，但如果仅仅是压力，倒也不算什么，但如果这样的观点本身就是错误的呢？这就意味着我们的错觉与实际情况存在误差，不稳定系统中误差必然发散，在变化多端的无人机行业与任务项目前，这份错觉将很有可能让工程师的生活彻底失控。

“误差”成立么？换句话说我们难道真的存在局限么？历史上很多人为我们做出了回答。

“我好像是一个在海边玩耍的孩子，不时为拾到比通常更光滑的石子或更美丽的贝壳而欢欣鼓舞，而展现在我面前的是完全未探明的真理之海。”如果牛顿仅仅将自己的成果当作对已有规律的少量发现，恐怕没有人敢说在自己一生中能达到无限的程度。当下人类社会所积累的知识、技术与牛顿所在的时代不可同日而语，也许当下数个月科技进步的幅度就超过了中世纪百年间的成就。但换一个角度，科技进步速度的不断提升，并不会让我们比以往有更多骄傲的资本，这样的高速度使我们当下技术的局限被越来越快的暴露出来，现代社会中技术人群的无力感比以往任何一个时代更快地显现出来，人类的局限将越来越明显。

既然现实是这样，不如坦然接受自己的局限，不要苛求自己可以处理所有问题，这样，焦虑的原因就只剩下害怕，随着时间的推移慢慢就会适应。但既然专注的领域已经需要占用全部时间和精力，就不要为无关的事项分心，总有些工作是只要抓住重点的，总有些情况是可以避免的，总有些技术是不需要掌握的，总有些书是无须花费时间阅读的。承认自己认知的局限不是放弃，而是正视，并采用合乎实际的策略与解决方案。适当地做减法，把精力放在真正需要专注的领域中，在自己擅长的领域正视焦虑，处理焦虑，这会让一切变得容易很多。

7.3 工作与生活

2015 年的一段时间里，在一个无人机项目中，城堡从早忙到晚，在系统调试不顺利的时候，情绪也自然而然地受到了影响。这让城堡把更多时间与精力投进项目中，虽然很辛苦，但城堡非常享受这样的工作过程，以至于沉浸其中不能自拔。该出现的问题总会来的，一天晚上城堡在家中和妻子吃过晚饭后，急忙回到电脑前继续工作，妻子走过来抱怨说“我们已经很久没有相处了”，听到这话城堡十分不解“刚刚不是陪你吃过饭了么？”妻子却哭了出来“你陪着我也是在想工作，在想项目……我怀疑自己是不是还在你的生活中”。既然如此，那么想办法多安排一些相处的时间吧……拿出日程表，计划了一会儿后城堡发现自己竟然挤不出任何时间。不对吧，再仔细想一想，算一算……一天 24 小时，除去吃饭、睡觉，竟排不出一点时间可以陪陪妻子。城堡意识到这个问题远比开始预料的更加严重，我没有把工作当成生活的一部分，却把生活当成了工作的一部分，这在很大程度上是一种失败。

这样的颠倒并不少见，它对工作和生活都是致命的。

将事业当作生活的全部，其中隐含的思维是在工作中投入所有时间，弱化甚至完全不考虑对生活的规划与设计。表面上看投入所有的时间在自己的事业上是顺理成章的事情，但这样的思维却很容易起到弱化效率的暗示。当存在对工作与生活时间的规划与设计环节时，工程师可以根据任务完成情况对计划或行动进行反馈修正，达到改善工作效率的作用。一旦不再区分生活和工作，很容易让工程师对时间采用“大撒把”的策略，形成“无论效率怎么改善，都要用完所有时间”的观点，从而省略掉规划和设计环节。但这样的想法对于工程师是非常致命的，在纷繁杂乱的工作中，低效的工作状态不但会占用大量时间且不会对个人发展产生实际效益，在养成习惯后将使一名工程师武功尽废。

讽刺的是在面对这样的陷阱时，不仅是工程师本人容易自投罗网，企业或公司有时也会对这种行为进行鼓励，很多时候甚至会以内部制度、企业文化等形式自设陷阱，强迫员工跳进去。这听上去很荒谬，但现实的扭曲程度往往超出我们的想象。虽然在短期内，这样的行为或制度可以为企业带来“看得见”的“收益”——漂亮的绩效、冲刺的进度、夜晚亮灯的办公楼……但随着时间的推移，公司规模，员工结构，业务体系都会不断变化。当公司规模足够大，这种体系下的员工升格为老员工，且达到一定比例，业务开始呈现新趋势时，企业将面对巨大的困境。同时，由于它是与企业内部制度或企业文化联系在一起的，届时断臂能



图 7.3 夕阳能分割昼夜却无法分割出我们的生活

(图片来源: pixabay)

否求生实在是未知之事。我国私人企业的年龄往往比较短，这类现象现在还不明显，但随着时间推移总会慢慢展现出来。从本质上来看，这是因为企业和个人都更容易关注眼下的短期收益，不愿通过长久坚持与不断修正积累变化。

我们在实际工作中能够掌控的实在有限，家人、朋友、我们自己的身体都可能带来突发情况。而这些不确定性不但停留在时间层面，更有可能延伸到心理层面，加重上一节中探讨的焦虑问题。就如同无人机系统中各个部分相互影响，可能只是一个不规范的程序，就足以使整个系统陷入混乱。无论是工程师本人还是企业，都需要对自己或员工的时间进行规划设计，充分考虑生活中的方方面面，把关注重点放在效率而非量的提升上。虽然从短期来看，可能要付出额外的精力进行体系化的考量与取舍，甚至与很多收益失之交臂，但随着持续不断的积累，形成良性的个人习惯或企业制度、文化，不但可以对工作产生积极的助推功效，还可以降低出错概率，构建个人或企业员工的发展体系，并实现持续优化。

7.4 基础技能

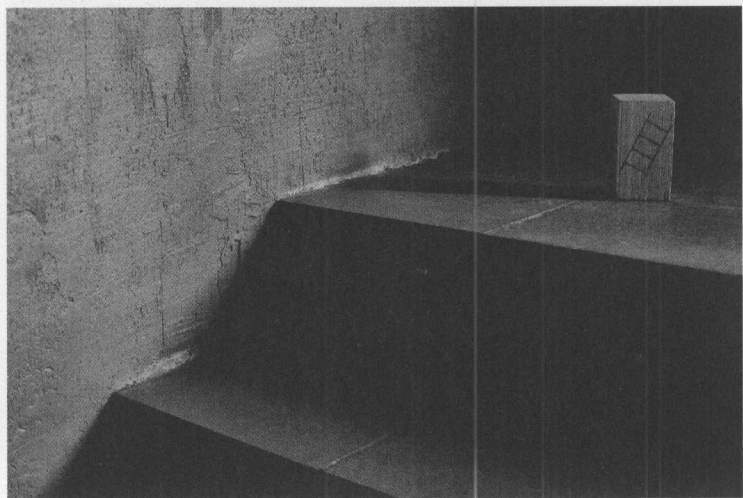


图 7.4 梯子稳不稳关键在根基（图片来源：pixabay）

城堡在前面提到过无人机属于交叉学科产物，当下行业尚处于不成熟阶段，对应的分工还很不明确，所以对无人机工程师在具体工作中的知识、技能要求没有统一标准，很难给出“无人机工程师只要具备某某领域的知识、技能就可以”这样的结论。

但这并不妨碍我们在其中挖掘出一些共性的基础技能，这些技能虽然不是成为优秀无人机工程师的充分条件，但在很多情况下是取得职业发展的必要条件。

1. 硬件手册阅读能力

无人机作为空中智能机器人，首先是一个硬件系统。从第五章中，读者可以看到无人机系统所涉及的传感器、芯片、元件种类繁多，在可预见的未来，势必还会有更多硬件加入其中。工程师需要具备对硬件系统进行选择、扩展、优化的能力，这一定离不开对其中涉及元件的理解和使用。

没有一本书可以囊括所有行业的硬件内容，因此工程师必须具备对硬件资料的阅读、查询、消化能力。一方面工程师可以根据项目需求、项目指标等可量化因素来选定元件，通过阅读、查询厂家提供的产品手册（或产品说明书）展开工作。不同厂家，不同元件的产品手册所涵盖的内容范围，详细程度存在一定差别，但至少会包含该元件使用过程中所需要的基本知识，如：工作原理、技术指标、安装布线、调试校验等。另外一方面，读者可以通过阅读所在行业元器件方面的专著来更深入地学习相关硬件的设计、使用原理。比如无人机工程师可以通过阅读《Sensor Technology Handbook》《Strapdown Inertial Navigation Technology》等书籍学习飞行器系统中不同传感器的设计结构、使用原理、数学模型等知识，从而帮助自己

在项目中使用、调试或设计相应的控制器。

城堡提醒各位读者，面对庞大的硬件系统，不要抱着“来者不拒”或“多多益善”的心态，这一定会造成大量时间与精力的浪费。读者应当有选择地进行知识技术积累，把当下任务系统中涉及的硬件进行归类，优先学习与未来职业发展规划相关的硬件知识，如熟悉相关硬件的生产厂商、硬件架构、接口特点、固件库说明、电路手册、设计原理等。由于这些硬件与当下或未来具体工作最相关，因此可以在工作中对所涉及的知识进行高效率实践，不断深化对它们的理解。如果涉猎的硬件范围太广，在工作中根本用不到或用到的机会很少，随着时间的推移，也会慢慢淡忘掉。

请读者赶紧走到无人机试验台旁边，把上面的硬件列成表格，翻一翻对应的技术手册吧。

2. 英语能力

很多工程师认为语言不属于技术范畴，因此在这方面进行积累纯粹是浪费时间。这种心态往往会引起畏惧或逃避的心理，让怀有这类想法的人下意识地远离英语使用，形成恶性循环。但事实上，英语能力（不仅是专业英语能力）的培养对于工程师的项目完成、职业发展、研究深造等各个方面都至关重要。

首先，很多无人机行业的最新资料或高质量资料只有英文版，在下一节的内容中，读者会看到很多资源、平台、资料、工具只有英文形式或只认可英文的交流方式。不具备专业领域的英文阅读、书写、交流能力将给工程师带来切实的麻烦与显而易见的损失。

其次，虽然很多资料已经有了中文翻译版本，城堡还是建议读者通过对原版英文内容的阅读来体会其中蕴含的逻辑体系。良好的英语阅读、理解技能可以让我们更好地领略这些知识、技能背后的逻辑深意。原版相比于翻译的优势是不难理解的，这与英文翻译在某种程度上无法完全表达我国某些诗词中的优美是一样的道理。科学或技术文献翻译内容的品质往往受译者个人理解的限制，对于工程人员而言，能够直接与原作者进行思维交流无疑是最理想的情况。

同时，在无人机这类智能机器人行业中的公司或职员免不了要与国际同行进行分享交流。良好的英文能力可以轻松地带来自诸多益处，如国际众筹或开源平台上的项目发布，跨国公司不同国家之间的内部交流，国际会议或展会中的宣传活动等等。这些资源对于个人和企业而言都是非常重要的。

工程师如何培养专业领域方面的英语能力呢？首先要注重对英文原版资料的使用。就算某些资料有翻译版本，城堡也建议读者阅读原版资料，不要形成对翻译版本的依赖。其次在阅读中不断记录所遇到的专业领域生词。每个专业领域的常用词汇数量都不会太多，且往往被不同资料重复使用，读者只要有意识地对这部分资料进行积累，不但可以取得快速进步，在不同资料的使用过程中加增信心，还可以形成属于自己的实用阅读方式。最后，大家可以尝试在阅读英文资料时更加关注其中的逻辑与表达方式。虽然相比于记忆单独词汇难度更大些，但它所带来的回报是非常丰厚的，一旦熟悉专业领域中的英文表达方式和习惯逻辑，甚至可以有效地帮助读者降低对相关理论、技术的理解难度，这将会在更加广泛的领域中带来巨大益处。

3. 搜集与处理资料的能力

无论是研究还是工作，无论是算法设计还是系统调试，无人机工程师在问题的深度与广度上都面对着巨大的挑战，这需要工程师在资料的搜集与处理方面具备改进的意愿和坚持的毅力。

随着互联网的普及与发展，各类搜索引擎使资料搜集的难度大大降低。容易做到，不等于容易做得好。当下工程师面对的已经不是能否找到资料的问题，而是如何从海量资料中挑

选出对当下任务切实有益的信息，并对这部分信息进行有效整理。快速寻找优质资料需要工程师在平日里下功夫，注意积累与行业相关的有益资源，如常见器材厂商的资料网页、行业专家的优质分享、国内外著名的开源软硬件资源等，这些看上去非常简单，可要做到持续跟进、整理就不那么容易了。

一旦拥有需要的资料时，如何对它们进行吸收就是摆在面前的一个难题。不同类型的任务可以匹配不同的资料处理方法。在时间紧迫的任务面前，要快速应用资料中的实用信息，并侧重实现与调试部分。而在日常的知识、技能积累上，则要对原理部分保持足够的精力投入，以形成自己的理解，保证这些重要的知识可以投入到实际工作中，并且不会因为仅是死记硬背就被漫长的时间冲刷殆尽。

一旦任务完成，就把资料随便堆在电脑硬盘中，是懒惰的表现，这是工程师的大忌。我们需要把眼光放得长远一些，能够看到这些资料日后的价值，为后面的项目推进和职业发展做出铺垫，可以把资料整理当作工程师职业生涯设计的具体实现。这个环节是如此重要，以至于我们可以透过工程师对资料的分类方式来了解他对自己职业生涯的规划，并评估当下其所体现出的专业成熟度。所以合格的工程师要根据自己的职业计划与发展情况构建资料整理体系，并不断对它进行维护和修正。

如同大厦建于一砖一瓦，优秀的行业工程师也是从对一份一份资料的搜集、吸收、整理中成熟起来的。

7.5 实用资源

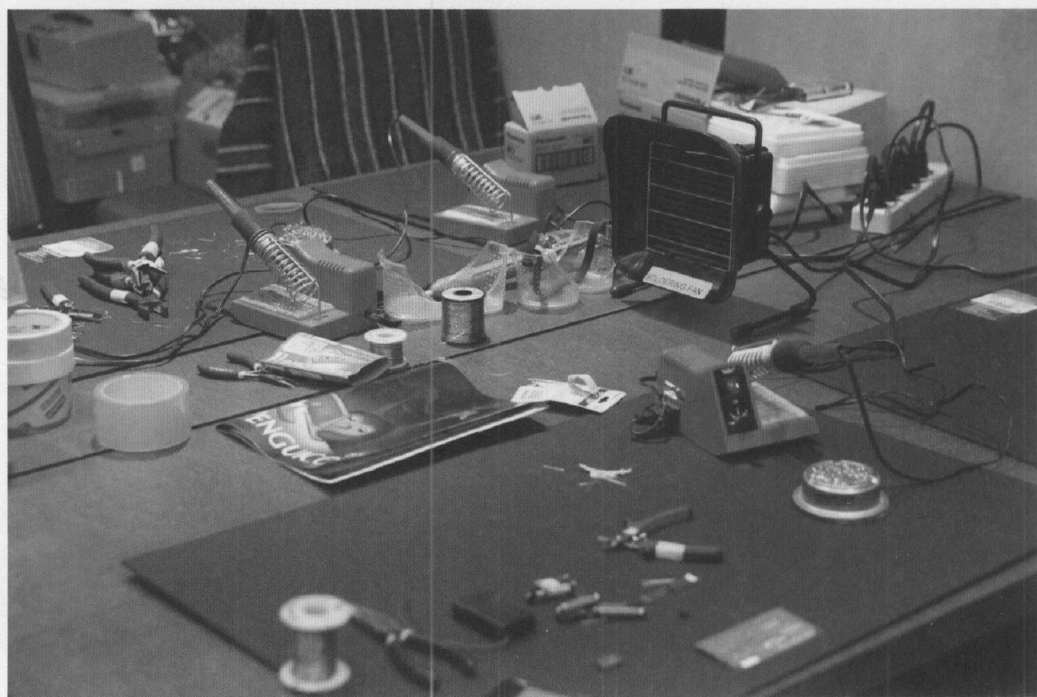


图 7.5 工欲善其事，必先利其器，比较完备的资源可以帮我们降低不少难度（图片来源：pixabay）

不同公司，不同职业对资源的具体需求不同。因此本节无法涵盖无人机行业中需要的所有资源，但读者可以将本节给出内容当作参考，从资源的类别出发，结合实际情况，建立满足职业或学习需求的资源体系。

1. 开源项目类资源

这类资源一般是已经产品化并持续更新的大型开源项目。一方面，这类项目有着较为庞大且相对完整的资料体系，可以看作涵盖硬件、软件、程序、算法等众多类型的资源集合。不同目的与职业身份的读者都可以从中获取所需要的开源资料。另外一方面，直接使用往往比较容易，但对它进行二次加工则存在一定难度。由于这些项目本身已经过多次更新，且有着自己的架构体系，需要初次使用者花费一定时间来熟悉项目脉络，投入足够的时间和耐心，才能在繁杂的开源资料中抓住与自己需求相关的重点内容。

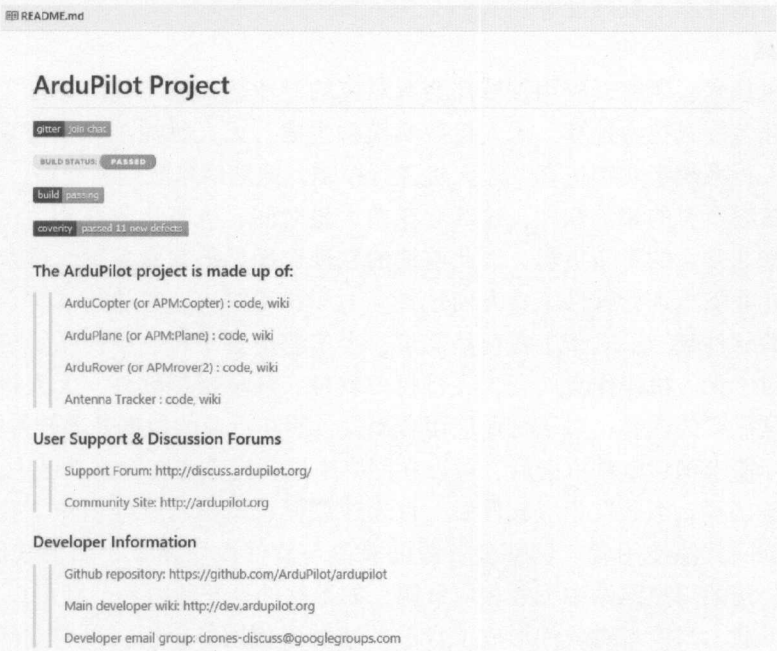


图 7.6 GitHub 上 ArduPilot 项目截图

读者可以在 GitHub 或类似的开源项目平台中获得相关资料，比如 Ardupilot、PX4、Multiwii、OpenPilot 等。以 Ardupilot 项目为例，读者可以在该项目中看到项目体系介绍，以及针对不同使用者的在线建议文档等内容。

2. 网络社区

与无人机相关的网络社区可以分为两类：专门的无人机网络社区和知识、技术分享社区。前一类的运营主体一般是无人机公司、飞控厂商、开源项目团队等，社区中的用户除去运营人员，一般是该公司产品或开源项目的使用者及潜在使用者。社区内容可分为两类，一类是由运营人员发布的，涵盖公司或团队产品在使用、维护、介绍等方面的内容。另一类内容由用户发布，涉及在使用前或使用中的应用方法、故障排除、性能咨询等。读者如果对某些产品或开源项目感兴趣，可以通过搜索公司或相关团队的网络社区进行了解，在这些社区里，资料内容、社区成员全部与无人机行业相关，读者可以从公司技术人员和使用者两方面获取所需资源。后一类知识、技术分享社区并不专注于无人机这一个领域。在这些社区中，无人机是作为关注领域的子领域存在的，如知乎、深圳湾、5iMX 等。由于关注范围相较于前一类社区更广泛，无人机领域的讨论强度、用户关注度往往不及前一类网络社区。但其优势在于不受专门公司或团队的限制，其所包含的无人机专题内容在客观性、广范度、深入度上有着独特的优势。如果读者想要了解无人机本身的专业知识、技能，而不是某种产品的使用方法，后一类社区可以提供更多有效资源。

3. 硬件厂商

这一类资源对于任何读者都是非常重要的，无论是无人机设计师、硬件工程师、嵌入式工程师、甚至是算法工程师都要习惯从硬件厂商那里获取技术资料。

这类资料的种类与数量更加庞大，可以是电动机厂商提供的电动机参数，也可以是旋翼厂商提供的拉力数据表或者芯片厂商提供的固件库与说明手册。没有一个网站能够把这些资料全部涵盖，读者可以结合 7.4 节中“搜集与处理资料”的相关建议，根据研究或工作内容建立、更新属于自己的资料体系，如常用的电动机、电调、传感器、旋翼等硬件的厂商名称，资料下载网址，固件库下载网址等。

4. 软件工具

任何无人机技术、研究、应用领域都会有对应的专业软件或专门的设计工具包。这些软件的功用范围涵盖旋翼拉力计算，无人机数学模型生成，无人机控制算法仿真，无人机应用环境仿真，无人机系统半实物仿真，无人机飞行控制，地理信息数据处理等。

读者无须掌握所有的相关软件，这既会花费大量时间，也不会收获到太多实际效果，并且会给日后带来非常大的更新负担，因此前期的软件选择显得非常关键。读者可以首先根据自己的职业或专业需求进行软件工具方向选择。对于科研需求，算法仿真平台、环境仿真平台是需要关注的软件领域；对于工程项目需求，半实物仿真平台、硬件系统模拟平台是需要关注的对象；对于无人机操作者而言，飞行模拟软件、环境模拟软件、无人机或飞控厂家的操作软件是经常需要的内容；对于行业应用者而言，所在行业的数据处理软件则是重点。

在根据实际需求确定软件方向后，可以在网络中进行搜索或在网络社区中询问软件名称，购买、下载的连接等。当获取相应软件后，首先建议读者直接从软件制作方获取使用手册进行阅读，而非询问其他使用者。这部分资源的获取与软件性质相关，如果软件是公司产品，一般可以从该公司的门户网站中下载相应资源，如果软件是开源内容，则可以登录 GitHub 或其他开源平台下载。当读者对软件形成了自己的感触或使用经历后，再遇到问题，就可以通过询问更有经验的使用者来解决。这样一个过程看上去花费了更多时间，实际上可以令读者的问题更加明确，更有针对性，从而在更长的时间范围内提高效率。要知道随着软件使用和项目任务的深入，我们遇到的问题会越来越复杂，这时能否对自己的问题进行前期处理将大大影响任务的完成效率，而这一切是建立在读者自己对软件使用的感触与经验之上的。

结 束 语

无人机行业潜力的极限在哪里？当下没有人能够给出准确答案。虽然这些年它正在以前所未有的速度进入人们的生产生活中，并在很多领域里取得了巨大成果，但时常令我们感到震撼的不是它已经做到了些什么，而是尚未开发领域的庞大程度。无人机研究人员、企业家、创业者、工程师依然面对着大量未达到之地：哪些领域还能应用无人机？是怎样的应用形式？产品的系统架构应该如何设计？包含哪些硬件？功能核心是什么？算法架构怎么设计？商业模式有哪些选择？已应用的领域如何进行细分？细分后产品架构、硬件体系、算法结构、商业模式又会有怎样的变化？……在诸多问题面前，我们肯定可以看到机遇，但更应该看到挑战。

无人机产品、硬件、技术的发展是有迹可循的，但它在很长的时间里待在实验室和大型项目中，与大众和一般企业的距离还是很远的。这就让我们容易仅仅根据无人机在当下的表现形式做出不全面的判断。这种情况一旦发生，丧失一些抢占先机的机会还是小事，如果给自己的职业发展或企业项目带来巨大损失那就太令人遗憾了。

因此城堡希望读者在浏览过本书的内容后，所获取的知识、技能是那些在很长时间内不会发生改变的东西，如功能理解、技术构成、设计方法、数学模型、计算公式、控制实现等。它们在无人机的发展过程中一直存在，当我们对这些“不变”的内容形成自己的理解后，一样可以根据它们对未来做出计划与判断。

如果读者还能从其中获取一些对自己生活、学习、工作具有更普遍帮助的内容，比如探索的方法，提问的激情，思考的习惯等，城堡就更开心了。本书非常看重“问题”，因此当您有任何问题、想法、建议时，欢迎随时通过微信、邮箱、知乎专栏等与城堡保持联系。

附录

词汇表

A

ACC (Accelerometer) 加速度计: 测量三轴直线加速度, 重力加速度。

AHRS (Attitude and Heading Reference System) 航姿参考系统: 内部包括多个轴向传感器, 能够为飞行器提供航向, 横滚和侧翻信息, 为飞行器提供准确可靠的姿态与航行信息。硬件结构为由陀螺仪 (Gyro)、加速度计 (ACC)、强磁计组成的完整系统。与 IMU 区别在于前者仅提供传感器信息, 而 AHRS 包含对姿态数据和航向信息的解算。

B

Bell-Hiller: 无人机主旋翼结构的一部分, 用于将自动倾斜器的输入转化为主旋翼变距。

BLDC (Brushless DC Motor) 无刷直流电动机: 输入为三相电, 是多旋翼无人机的主要动力元件。常用简写还包括 BLDCM、BDCM。

BDS (BeiDou Navigation Satellite System) 北斗卫星导航系统: 就是北斗系统。

BEC (Battery Elimination Circuit): 为 FCU 提供稳定 5V 电源输入。

C

CES (International Consumer Electronics Show) 国际消费类电子产品展览会。

Compass 电子罗盘: 借助自身磁通量传感器感应到周围环境磁场变化, 从而指导飞控确定飞机航向。

D

DGPS (Differential Global Positioning System) 差分全球定位系统: 通过位置差分、伪距差分、载波相位差分等不同方式提高定位精度。在硬件上相比于 GPS 增加了基准站。

E

ECEF (Earth Centered Earth Fixed Coordinate System): 地球中心坐标系。

ESC (Electronic Speed Control) 电调: 全称电子调速器。输入为直流电, 输出为三相电。同时具有稳压能力。在无人机中的作用一方面根据飞控输入来输出对电动机的控制电流, 一方面通过 BEC (Battery Elimination Circuit) 为飞控提供 5V 电压。

F

FCS (Flight Control System) 飞行控制系统: 与 FCU 区别, FCS 是包含 FCU 及其他硬件、

软件、算法的系统集合。

FCU (Flight Control Unit) 飞行控制单元：接收并处理从接收机发来的遥控器信号；接收并处理传感器发来的反馈信号；通过相应算法得出机体信息；通过相应算法结合机体信息得出控制输出量；将控制输出量给出到执行器部分的软件与硬件的结合。

Flybar 副翼：常见于直升机主旋翼系统，作用是为主旋翼挥舞提供更大的系统阻尼。在一些设计中已被电子增稳系统取代。

G

GCS (Ground Control Station) 地面控制站（常被简称为地面站）：无人机地面控制站形式不一，但在功能上至少应该具备对无人机运动的控制能力和人机交互界面。当下地面控制站的功能越来越强大往往包括，但不限于下列功能：无人机飞行控制、无人机导航控制、无人机导航任务设定、无人机硬件校准、无人机数据处理、无人机路径自动规划、参数调整等。特别提醒，“地面站”这个简称更常用于描述卫星地面站，建议大家在无人机系统中使用“地面控制站”来区分描述。

GMU (GPS&Magnetometer Unit) GPS 磁罗盘模块：与其成为一种硬件名称，城堡更倾向于将其看作无人机飞控子模块的一种设计方式。由于位置要求、干扰来源等因素，可以将 GPS 和强磁计放在一个模块里。

GPS (Global Positioning System) 全球定位系统。

Gyroscope/Gyro 陀螺仪：常用基于 MEMS 的压电式陀螺仪。芯片的输出信号是与所测得的角速度大小成正比的电压变化。

I

IDE (Integrated Development Environment) 集成开发环境：英文缩写经常重名，懒惰就会带来这些麻烦，在无人机行业一般翻译为集成开发环境，也就是无人机程序编写、编译、下载的软件环境。

IMU (Inertial Measurement Unit) 惯性测量单元：6 自由度 IMU 主要包括陀螺仪，加速度计，分别测量三个轴向的旋转角速度和三个轴向的直线加速度——为机体坐标系下数值。

IRDS (infrared distance sensor) 红外测距传感器，常见的其他简写如 IR distance sensor 都是相同含义。

L

LiPo (Lithium-Polymer Battery)：锂聚合物电池。

LIU (LED Indication Unit) LED 指示单元：通过 LED 闪烁来确定一些功能的实现或者飞行状况的确认。

M

MEMS (Micro-Electro-Mechanical System)：微机电系统技术。

N

NED (North-East-Down Coordinate System)：当地水平坐标系。

O

OSD (on screen display) 视频叠加模块或者屏幕叠加模块：这个名字不知为何城堡一开始总觉得很高大上，后来发现它无论是功能还是体积都是小角色。一般在 FPV 屏幕中叠加飞行器姿态信息，以便于超视距飞行操作。其实就是在图传回来的信号数据中叠加数据。

P

PMU (Power management) 电源模块：对输入电源进行稳压与转换，一般输入电压值可能为 10 ~ 12.6V 之间，飞控板需要的控制芯片大多需要 5V 稳定电压，数传天线则可能需要 3.8V 电压，根据 GPS 模块的不同，可能需要 8V 供电等。这时就需要多通道的电源模块对电压值进行调整和稳压。

Propeller 螺旋桨：最常用于固定翼机型，也用于多旋翼机型，在这种情况下与 Rotor 混用。

R

RC (Remote control/Radio control)：在相关资料中经常会看到这个词，一般是 Radio control (无线电控制)，也有过 Remote control (远程控制或者遥控器控制)。但本质上都是一样的，只不过控制的电磁波频段不同，就分为无线电、红外线或其他波段控制方式。一般采用的遥控器控制是 2.4GHz 频段，但在地面控制站数据通信中有会用到 980MHz。

RC (Remote controller/Radio controller) 遥控器：接收并处理从接收机发来的遥控器信号；接收并处理传感器发来的反馈信号；通过相应算法得出机体信息；通过相应算法结合机体信息得出控制输出量；将控制输出量给出到执行器部分的软件与硬件的结合。注意：有时 Remote control 也用作遥控器。

RCC (Remote control channel/CH)：通过遥控器操纵无人机某种被控变量的途径。举例而言，控制无人机俯仰的途径为俯仰通道（纵向通道），偏航的为偏航通道，横滚的为横滚通道（横向通道）等。

Receiver 接收机：接收遥控器发送的电磁波并将控制信息转送给飞控板。

Rotor 旋翼：分为变距桨和定距桨。变距桨多用于直升机型无人机，定距桨多用于多旋翼无人机。

S

SM (Servo motor) 伺服电动机：这个词汇的缩写充分体现出很多工程师确实需要更多的室外活动。在小型无人机领域中用到的伺服都很小，而且主要用于直升机型的无人机或者多旋翼机航拍时的云台。好处是响应速度明显快于无刷直流电动机，以前伺服电动机的数学模型是一阶惯性加延迟，现在随着响应速度的进一步提升延迟部分已经可以去掉了。伺服电动机的控制精度非常高，从位置 A 到位置 B 有着快速精准的优势。

T

TPP (Tip-Path-Plane) 桨尖平面：反映了无人机主旋翼升力方向，是对无人机进行姿态控制的重要参照对象。

Trim 配平：通过调整无人机姿态使得无人机在三个通道（横向，纵向，垂向）上速度，加速度为零，配平是稳定控制与数据采集的基础。

V

VTOL (Vertical Take-Off and Landing) 垂直起降: 指飞行器具备的垂直起降的能力。具备 VTOL 能力的飞行器常见的有: 直升机型、多旋翼型、涵道型以及上述类型的复合型飞行器。特别注意, 自转旋翼飞行器不具备 VTOL 能力。

W

WGS-84 (World Geodetic Coordinate System 1984): WGS-84 大地坐标系。

WP (Work point) 工作点: 指无人机开始工作使的状态 (姿态, 各通道控制输入等)。无人机一般是非线性的被控对象, 线性化都只能在某个点的附近。在实际使用中, 一般是调整遥控器各通道初始值, 使得无人机启动即达到配平状态的工作点。

参考文献

- [1] 约翰·贝克托. 无人机 DIY [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [2] 亚力克斯·埃利奥特, AlexElliott, 埃利奥特, 等. 无人机玩家 DIY 指南 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
- [3] 胡一凡. 飞行机器人的建模和控制 [D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- [4] 徐嘉, 范宁军. 涵道无人机研究现状与结构设计 [J]. 飞航导弹, 2008 (1): 10-14.
- [5] 张谦. 基于 GPS 的综合惯性导航系统 [D]. 广州: 华南理工大学, 2004.
- [6] 周焱. 无人机地面站发展综述 [J]. 航空电子技术, 2010, 41 (1): 1-6.
- [7] Bouabdallah S. Design and Control of quadrotors with application to autonomous flying [J]. Epfl, 2007.
- [8] Stevens B L, Lewis F L, Johnson E N. Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems, Third Edition [M]. 2015.
- [9] Titterton D H, Weston J L. Strapdown inertial navigation technology [M]. Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [10] 贺兴柱. 多涵道无人机总体设计及气动特性分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [11] 董凌华. 倾转旋翼/机翼气弹耦合动力学研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [12] 王俊超. ZX-1 型旋翼机高速型总体方案设计研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [13] Padfield G D. Helicopter Flight Dynamics: The Theory and Application of Flying Qualities and Simulation Modelling, Second Edition [M]. Blackwell Science Ltd, 1996.
- [14] Mettler B F. Modeling small-scale unmanned rotorcraft for advanced flight control design [M]. 2001.
- [15] 李远. 多 UAV 协同任务资源分配与编队轨迹优化方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [16] Ojha S K. Flight Performance of Aircraft [J]. 1995.
- [17] Bothe H. Introduction to Flight Test Engineering [M]. AGARDograph 300, AGARD Flight Test Techniques Series, Vol. 14 Antenna Radiation Patterns. DLR, 1995; B1-B24.
- [18] 王伟, 马浩, 徐金琦, 等. 多旋翼无人机标准化机体设计方法研究 [J]. 机械设计与制造, 2014 (5): 147-150.
- [19] 罗健. 无人机协同跟踪地面移动目标的研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2011.
- [20] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [21] Khalil H. Nonlinear Systems (3rd Ed.) [J]. 2002.

无人机在线学习平台、无人机职业飞手社群：
无人机世界（公号uavwww）推荐



城堡里学 无人机

原理、系统与实现

❖ 内容简介 ❖

本书是一本关于无人机概念、原理、系统与实现的参考书,共分三篇,七个章节。主要内容有:无人机的故事、无人机的类型和控制方式、无人机的软硬件系统、无人机行业应用、以及学习无人机所需的基础技能和各种共享资源等相关知识。本书着重阐释了无人机行业、市场、读者职业三者之间的相互关系,并结合无人机实际应用和制作指导为读者提供进入无人机领域的各项知识,将实用性、趣味性、理论性充分融合,可以帮助读者尽快跨入无人机的世界。

本书的主要读者是无人机领域的爱好者、从业者和其他行业的无人机应用者或有意应用无人机的那些读者,相关院校和专业的师生也可将此书当作培训教材或辅导教材使用。



地址:北京市百万庄大街22号

邮政编码:100037

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

网络服务

机工官网: www.cmpbook.com

机工官博: weibo.com/cmp1952

金书网: www.golden-book.com

教育服务网: www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版



机械工业出版社
微信公众号



机械工业出版社计
算机分社官方微信



机工IT互联网
工厂微信服务号

上架指导 人工智能/无人机

ISBN 978-7-111-57554-2

策划编辑◎丁 诚 / 封面设计◎



子时文化
ZISHI Culture



ISBN 978-7-111-57554-2



9 787111 575542 >

定价:59.00元